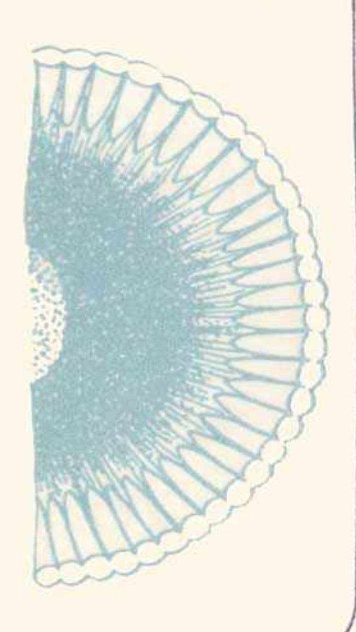
FIBROÓPTICA



D. K. Sattárov



Editorial
Mir
Moscú


ИЗДАТЕЛЬСТВО
МИР

Д. К.

САТТАРОВ

ВОЛОКОННАЯ ОПТИКА

Издательство

«Машиностроение»

Ленинград

Fibro-óptica

D.K.
SATTÁROV

EDITORIAL
MIR
MOSCÚ

Impreso en la URSS. 1977

Traducido del ruso por
Dr. Jaime Castro Blanco

На испанском языке

ÍNDICE

PREFACIO

La descripción de muchos descubrimientos y alcances científicos empieza con la frase: en la fecha tal, en una revista científica se publicó una información resumida, de cuya existencia sólo sabía un círculo reducido de especialistas y la cual tuvo muy poca repercusión. De esta forma el significado del descubrimiento o del logro científico permanecía subestimado por espacio de algún tiempo. Con el descubrimiento de la óptica de fibras no sucedió así, pues tanto los científicos como un buen número de lectores tenían conocimiento de ella a través de revistas de divulgación científica y de los diarios, en los cuales estas informaciones frecuentemente tenían un carácter sensacionalista. Las investigaciones tanto teóricas como experimentales en la esfera de la óptica de fibras tan sólo comenzaban a tener una base sólida. Al mismo tiempo, una accesibilidad y sencillez falsas de la comprensión de los métodos de la fibroóptica condujeron a la aparición de una gran cantidad de ideas en cuanto a la aplicación de los elementos fibrosos en la fabricación de aparatos y un sinnúmero de diseños de «dispositivos en principio nuevos». Por esta razón,

en la primera década del desarrollo de la óptica de fibras, los factores científicos, los éxitos técnicos, la actitud pesimista y los pronósticos optimistas se mezclaron tanto que incluso los especialistas dedicados a la óptica de fibras tuvieron que buscar respuestas a muchas incógnitas. Por ejemplo, ¿se ha confirmado el efecto técnico-económico que se esperaba, o éste resultó negativo?, ¿qué se puede plasmar tecnológicamente y qué es sólo un propósito deseable?, ¿qué parámetros de los elementos de la óptica de fibras son factibles y realizables en la práctica?, etc.

La fibroóptica ha sido considerada por mucha gente como un milagro e incluso hoy aparecen artículos y folletos con semejantes títulos. Sin embargo, aunque ella posee grandes ventajas, tiene también deficiencias objetivas. El empleo de los métodos de la fibroóptica está regido por las leyes generales de la propagación de la radiación a través de las guías de luz monofilares o multifilares; por la posibilidad de realizar, mediante diferentes procedimientos tecnológicos, la construcción de un determinado elemento fibroso; por los principios de aplicación, por las condiciones de trabajo en combinación con otros medios técnicos; por los sistemas y por muchos otros factores. La subestimación o la falta del conocimiento del carácter específico de los problemas conduce en la práctica, a una indeterminación del límite entre lo posible y lo imposible respecto a la fabricación de dispositivos a base de fibras; esto, desafortunadamente, a veces está relacionado con la pérdida de grandes valores materiales y de tiempo dedicados a la realización de investigaciones teóricas y experimentales a todas luces fallidas.

Existe otro aspecto de este problema: el desconocimiento de los fundamentos principales y de los métodos concretos de la fibroóptica con-

duce frecuentemente a la elaboración de elementos fibrosos de diseño y fabricación demasiado complejos, los cuales pueden ser reemplazados por otro aparato fibroso de construcción sencilla, de una elaboración relativamente fácil desde el punto de vista tecnológico y, como regla general, de tamaño pequeño, de gran seguridad en la explotación y con parámetros ópticos más altos.

Indudablemente, las posibilidades de la fibroóptica todavía están muy lejos de agotarse y es difícil imaginarnos qué otros dispositivos originales y de gran efectividad podrán realizarse con su ayuda.

La experiencia del autor en la elaboración de diferentes elementos fibrosos permite afirmar que las posibilidades de la fibroóptica son frecuentemente soprendentes incluso para un experto y, como norma, conjugadas con un alto efecto técnico-económico, que apenas ha empezado a revelarse.

ÓPTICA DE FIBRAS: NUEVA TENDENCIA EN LA CONSTRUCCIÓN DE APARATOS

1

Entre todas las ramas de la Física, la óptica ocupa verdaderamente una posición principal, determinante o, como afirma el profesor de la Universidad de Londres S. Tolansky, un lugar privilegiado. No es necesario demostrar que la utilización de las leyes ópticas juega un papel excepcional en la vida del hombre. La maravillosa facultad de admirar todo aquello que diariamente pasa frente a sus ojos se lo debe el hombre a la luz. Contemplando todo lo que ocurre a nuestro alrededor no podemos dejar de pensar que la imagen del mundo exterior llega a nuestro conocimiento como información luminosa. ¡Casi el 100% de la información, el hombre la obtiene a través de su canal visual! Recuerde al espec-

tador en el cine, al mecánico en su máquina, al operador frente al tablero de mando, al cosmonauta en su nave, etc. La historia de la ciencia muestra el papel predominante del estudio de las propiedades de la luz en el desarrollo de la Física desde las fuentes del pensamiento científico hasta las más célebres teorías modernas, como la teoría cuántica y la teoría de la relatividad. Es conveniente recordar la expresión proverbial de W. Bragg: «La palabra «luz» contiene toda la Física y como tal todas las ciencias».

No obstante, hace algún tiempo entre un número reducido de científicos, generalmente no dedicados a la óptica, se expresó la idea (¡aunque cuidadosamente!) de que la óptica era ya una ciencia terminada, en la que tan sólo podría perfeccionarse lo logrado, sin que se esperaran saltos cualitativos. Sin embargo, la vida ha rebatido tal hipótesis. Durante los últimos 15—20 años se han desarrollado en forma impetuosa nuevas tendencias en la óptica: la técnica de los generadores ópticos cuánticos, la holografía, la termovisión, la óptica de fibras y los métodos ópticos de procesamiento de la información basados en estos logros. El desarrollo de la nueva óptica es imposible sin la realización de materiales ópticos originales. Las tendencias indicadas en conjunto caracterizan *cualitativamente* una nueva etapa en el desarrollo de la óptica como ciencia.

Hay que señalar ante todo que los métodos ópticos modernos son inconcebibles sin la óptica clásica. A la vez, los métodos de la óptica clásica en combinación con las nuevas tendencias de la ciencia óptica dan procedimientos altamente efectivos para procesamiento de la información. Por ejemplo, los métodos de la fibroóptica son realizables, como regla, en combinación con los sistemas ópticos clásicos, y esta combinación

permite resolver problemas imposibles de solucionar por medio únicamente de la óptica clásica o los que pueden ser resueltos con su ayuda, pero tan poco elegante que no se puede hablar de una amplia utilización práctica de tal solución.

La óptica clásica y la nueva óptica en conjunto dieron un impulso efectivo para el ulterior desarrollo de la ciencia y la técnica en otras direcciones como, por ejemplo, en la construcción de dispositivos óptico-electrónicos, en la medicina, en la cibernética, en la acústica, en la luminotecnia, en la televisión, en la construcción de aparatos de medida, de dispositivos nucleares, etc. Por ejemplo, lo que antes parecía una simple ilusión de los médicos, quienes exclamaban: «¡Si lo pudieran ver los ojos!», ahora es una realidad gracias a la nueva óptica. Hoy, sin necesidad de una operación pueden ser accesibles a la observación prácticamente todos los órganos internos del ser humano.

1. LUGAR QUE OCUPA LA FIBROOPTICA EN LA CONSTRUCCION DE APARATOS

Las nuevas tendencias de la óptica: los generadores ópticos cuánticos, la holografía, la termovisión y la óptica de fibras están estrechamente relacionadas entre sí y a menudo se entrelazan. Así, los generadores ópticos cuánticos y los amplificadores de luz, conocidos también bajo el nombre de láseres, están realizados en las construcciones a base de fibras y de guías de luz. En las líneas de telecomunicaciones ópticas, la información en forma de rayo láser se transmite a través de haces de fibras (guías de luz pasivas); la radiación atenuada en las fibras se amplifica por medio de láseres —«retransmisores» inclusive los de fibras luego se transmite hasta el si-

guiente retransmisor a través de guías (conductos) de luz pasivas y así sucesivamente.

La óptica de fibras penetra cada vez más ampliamente, en la holografía. Ya hoy están demostradas la posibilidad y la efectividad de la utilización de los elementos fibrosos bien sea en la rama de funcionamiento del interferómetro holográfico (por ejemplo, entre la placa fotográfica y el objeto), bien en su rama de apoyo, bien en ambas simultáneamente. Cada día aumenta el número de trabajos sobre este tema.

Las fibras transparentes en la parte infrarroja del espectro han empezado a utilizarse en dispositivos de termovisión.

Los elementos de guías de luz se han convertido en parte integrante de gran efectividad en muchos dispositivos para las investigaciones científicas.

La combinación de la óptica clásica y de la nueva óptica con los logros en otras ramas de la ciencia y la técnica condujo a la aparición de tendencias completamente nuevas, tales como la optoelectrónica, la icónica, la percepción automática de imágenes acústicas, la técnica de las computadoras de acción rápida y de los dispositivos cibernéticos, totalmente ópticos. En todas estas esferas la óptica de fibras juega un papel muy importante.

Muchos científicos creen que el descubrimiento de la óptica de fibras cumplirá en la ciencia física el mismo papel revolucionario que desempeñó en su época la aparición de los semiconductores. Hoy día la práctica confirma esta opinión.

Optoelectrónica. En el punto de enlace de la óptica, de la mecánica cuántica y de la electrónica ha aparecido en los últimos años (se considera el año 1961 como el comienzo) y se desarrolla intensamente una nueva rama de la óptica,

la optoelectrónica, en la cual se utilizan los métodos electronofotónicos de transmisión, almacenamiento y reproducción de la información. El funcionamiento de los dispositivos optoelectrónicos se basa en los procesos de transformación de señales eléctricas en luminosas y viceversa. Si en los aparatos radiotécnicos y electrónicos corrientes, la transformación (transmisión y conversión) de información se realiza por medio de flujos electrónicos (corriente eléctrica, haz electrónico), en la optoelectrónica, las funciones del flujo de electrones las cumple un haz luminoso. Los dispositivos optoelectrónicos se diferencian de los sistemas radioelectrónicos y electrónicos clásicos en una mayor rapidez de acción, mayor seguridad, dimensiones considerablemente menores, menor consumo de energía, una gama útil de frecuencias más amplia, un bajo nivel de ruidos (falsa información, interferencias) y otras ventajas.

La optoelectrónica encontró amplia aplicación en sistemas radiotécnicos para aumentar su efectividad y simplificar el manejo y procesamiento de la información; en dispositivos de reproducción de la imagen; en sistemas lógicos y de memoria de las computadoras de acción rápida; en dispositivos indicadores de exploración; en sistemas automáticos, en electrónica industrial y otras esferas. La optoelectrónica es inconcebible sin la óptica de fibras.

Los tres elementos fundamentales en los dispositivos optoelectrónicos son: las fuentes luminosas, los transformadores fibrosos de luz (sistemas de guías de luz) y fotorreceptores. Precisamente con ayuda de los elementos de fibras en la optoelectrónica se llevan a cabo la transmisión, la transformación y la reproducción de la información, y mediante la utilización de láseres de fibras y placas de microcanales (elementos acti-

vos), la transformación espectral y amplificación de la luminosidad de la información.

Icónica. Los sistemas de reproducción de imágenes-ópticos, fotográficos, de televisión y otros— desempeñan un papel cada vez más importante en la vida del hombre moderno, en las investigaciones científicas y en la producción. En los años 1964 y 1965 en el punto de unión de la óptica, la televisión, la fotografía, la biofísica y la teoría de la información surgió una nueva rama de la ciencia: la icónica, que analiza los problemas referentes a la transformación de la información en sistemas de reproducción de imágenes. Estas transformaciones en la icónica se dividen en dos grupos: codificación y descodificación de las imágenes.

La tarea fundamental de la icónica es la elaboración de métodos óptimos de codificación y descodificación de imágenes, que garanticen los valores límites óptimos de los parámetros para una calidad dada de la reproducción, tomando en cuenta las limitaciones impuestas al sistema, es decir, la icónica es la teoría de los sistemas óptimos de reproducción de imágenes.

Actualmente se proyecta probar y modelar muchas deducciones teóricas de la icónica aplicando los métodos de la óptica de fibras como medio que desintegra la imagen inicial— original— en elementos, la codifica, la transmite a distancia y reproduce la imagen descodificada con determinado grado de similitud con el original. En este sentido, la fibroóptica es un método altamente efectivo en la comprobación experimental de las conclusiones de la icónica.

Percepción automática de imágenes acústicas. Los métodos para la percepción automática de imágenes acústicas adquieren cada año un mayor significado en muy variadas esferas de la ciencia y la técnica. Por una parte, en esto

se manifiesta el sueño eterno del hombre de lograr que el ojo pueda observar las imágenes acústicas (recuerde el refrán popular «Es mejor verlo una vez que oirlo mil veces»), por otra parte existe la tendencia del hombre a dirigir las máquinas por medio del sonido, es decir, de realizar en forma verbal la comunicación del hombre con la máquina. En los últimos años, la técnica de la percepción automática de las imágenes acústicas ha alcanzado un gran significado en relación con el hecho de que el control automático del trabajo de las máquinas —generadores, motores, sistemas energéticos, secciones mecanizadas de la producción y de otras muchas instalaciones puede facilitarse considerablemente con ayuda de los métodos de la percepción automática y del análisis del «ruido», que producen las máquinas en funcionamiento. No menos importantes son las tareas relacionadas con la percepción de ruidos audibles en la navegación, en el transporte, en la medicina, etc.

El avance en el desarrollo de los métodos de la percepción automática de imágenes acústicas se debe al empleo en éstos de elementos de la fibroóptica llamados septrones: un «cepillo» diminuto de un gran número de independientes fibras ópticas de longitud y sección diferentes. Durante la grabación de un sonido las fibras vibran según la fuente y el carácter del ruido, produciendo en el panel de control un dibujo luminoso estrictamente determinado. Al llegar el sonido grabado, éste se percibe con ayuda de fibras vibrantes transparentes a la luz y de un fotodibujo en el panel de control. Las grabaciones septrónicas se utilizan con éxito en las diagnosis técnica y médica.

La óptica fibro-electrónica. Los elementos de la óptica fibro-electrónica consisten en láminas

de una multitud de fibras metálicas electroconductoras aisladas entre sí y del medio externo por capas intermedias de vidrio. La tecnología para la fabricación de estas placas se basa completamente en la tecnología que comúnmente se utiliza en la fibroóptica: un elemento monofilar se estira y se recubre con vidrio aislador, se toma luego un manojo de elementos monofilares y se aprietan para formar elementos polifilares; estos últimos se cortan, se colocan en un molde y se someten al prensado en caliente.

El recubrimiento aislador de vidrio puede ser de una sola capa o de tres capas. En el último caso, la capa anular del centro tiene un índice de refracción mayor que el de las capas anulares de vidrio contiguas; dicha lámina puede cumplir tanto la función de cable conductor como la de guía de luz.

Como material para el alma del cable conductor puede usarse no sólo metal, sino también vidrio electroconductor; esta alma puede servir de cable eléctrico o de guía de luz de la radiación infrarroja.

La óptica fibro-electrónica ya hoy día encuentra una amplia aplicación en los dispositivos indicadores, en las rejillas piezoeléctricas, en las instalaciones para la holografía, etc.

Una placa de la óptica fibro-electrónica puede utilizarse para el almacenamiento, transferencia, amplificación y visualización de la figura de la distribución de un campo electrostático lo mismo que en calidad de dispositivo impresor de acción rápida que asegura un alto poder de resolución, por ejemplo, para la grabación de los resultados de un cálculo en una computadora electrónica. En este caso la impresión se lleva a cabo en un papel especial, que recibe carga eléctrica, cuya distribución es portadora a la salida de determinada información.

El papel se elabora de manera semejante al método que se emplea en las máquinas de xerografía y multicopistas.

Exploración automática y sistemas de exploración. Esta rama independiente y de rápido desarrollo analiza los problemas de la formación, transmisión, discretización óptima, almacenamiento y reproducción de la información por medio de los métodos de exploración; estudia la teoría de la construcción racional de los esquemas estructurales de información y de los sistemas concretos de exploración, así como la separación de esquemas estructurales óptimos destinados a la solución de problemas informativos de una clase determinada. Algunos métodos de exploración automática y los mismos sistemas de exploración se estudiarán más adelante. Aquí solamente subrayamos el hecho de que precisamente el surgimiento de la fibroóptica y las nuevas posibilidades descubiertas mediante la conjugación racional de los métodos de la fibroóptica con la técnica del láser y con la construcción de los aparatos óptico-mecánicos y óptico-electrónicos dieron un impulso eficaz y cualitativo hacia un efectivo desarrollo y una aplicación práctica de la ciencia en la exploración automática y en la técnica de los sistemas de exploración.

Radioelectrónica y la construcción de los aparatos óptico-electrónicos. Un papal auténticamente revolucionario en vías del desarrollo ulterior de la radioelectrónica y de la construcción de dispositivos óptico-electrónicos lo ha desempeñado la utilización en dichos sistemas de elementos a base de fibras: aumentó sustancialmente el alcance, se elevaron considerablemente la seguridad y la protección contra los ruidos parásitos, aumentó la rapidez de acción de los sistemas en el procesamiento de la infor-

mación, se simplificaron los métodos de la transmisión, almacenamiento y reproducción radioelectrónicos de la información; en la mayoría de los casos disminuyeron el tamaño y el peso de los sistemas, aumentó notablemente el volumen de la información procesada, mejorando al mismo tiempo su calidad, se simplificaron los métodos de la visualización de señales, etc.

En la literatura técnico-científica han aparecido nuevos términos: la técnica de la radioelectrónica fibroóptica, la construcción de aparatos fibroelectrónicos, la bobina de choque fibroóptica, el transformador fibroóptico, la técnica de la radiotelefonía fibroóptica, etc.

Los principios de la utilización de los elementos a base de fibras en la construcción de aparatos radioelectrónicos y óptico-electrónicos se analizarán más adelante con ejemplos concretos de dichos dispositivos. Ahora citaremos tan sólo un hecho: en varías monografías dedicadas a la construcción da aparatos óptico-electrónicos publicadas en los años 1961-1965, es posible encontrar la afirmación de que los convertidores de cascada óptico-electrónicos no habían logrado una amplia difusión.

Actualmente los convertidores de cascada óptico-electrónicos son aparatos ampliamente utilizados en diferentes ramas de la técnica. Este cambio cualitativo en la aplicación de dichos dispositivos se debe a la fibroóptica.

Optica no lineal. El gran científico soviético S. I. Vavílov, ya en el año 1944 escribió que «la verdadera óptica de la sustancia con la cual tenemos que trabajar generalmente es no lineal, y su explicacón requiere un aparato matemático no lineal». Precisamente S. I. Vavílov fue el primero en descubrir la alteración de la linealidad de las ecuaciones de la óptica durante la interacción de la radiación con la

sustancia. Hoy día la óptica no lineal es uno de los campos más interesantes desde el punto de vista teórico y práctico de las investigaciones de la física de la interacción de potentes flujos de radiación con la sustancia. La no linealidad de la óptica se manifiesta claramente en el proceso en el cual el rayo láser pasa a través de diferentes sustancias. La esencia de este fenómeno consiste en lo siguiente: en un medio inicialmente homogéneo aparecen canales guías de luz temporales. En lugar de la dispersión corriente del rayo a causa de la difracción, en el caso de que la luz sea de alta intensidad se produce su autoenfoque en la sustancia. Esta «supresión» original de la difracción se puede explicar por el hecho de que el índice de refracción n del medio depende de la intensidad E de la radiación y precisamente n crece al aumentar la intensidad E de la luz, es decir, el medio en la región ocupada por el haz de luz (por ejemplo, por el rayo láser) se vuelve más denso, lo que conduce a una compresión o autoenfoque del haz y a la variación del índice de refracción según la ley $n = n_0 + n_2E^2$, donde n_0 es el índice de refracción del medio en el caso de pequeñas intensidades de luz (por ejemplo, fuera del haz láser). De esta manera, en el medio dentro del rayo láser, el índice de refracción, a diferencia de los planteamientos de la óptica clásica, es variable.

Actualmente se lleva a cabo una amplia labor investigativa del efecto de canalización (el autoenfoque y la formación de las guías de luz) de potentes haces de láser. Se plantean diferentes explicaciones de la física de este fenómeno. Citaremos tan sólo una de ellas: una onda luminosa potente origina en el medio una presión suficientemente grande debido a lo cual el material se densifica y por lo tanto aumenta

el índice de refracción del medio en el momento en que sobre éste actúa una radiación potente. Algunos investigadores suponen que al descubrimiento de la esencia física de la formación de los canales guías de luz en un medio inicialmente homogéneo, puede contribuir en gran parte el estudio de las leyes de propagación de la radiación a través de guías de luz y guías de onda transparentes monofilares y multifilares, cuyos índices de refracción experimentan bien un cambio brusco en la frontera de separación entre el conducto de luz y la capa aisladora de luz, bien varían continuamente (disminuyen) desde el centro de la guía de luz hasta su borde (las llamadas guías de luz «autoenfocadores»).

El estudio del autoenfoque de la luz es uno de los problemas más actuales e interesantes de la óptica no lineal. Posiblemente la investigación de este efecto conducirá a la creación de nuevos métodos de transmisión por medio de láser, a través de canales temporales conductores de luz, no solamente de información luminosa desorganizada, sino también de una imagen óptica. Esta última se puede formar en la superficie de entrada de un medio homogéneo por efectos de un haz de rayos láser en forma de relieve de la intensidad de la luz en el corte transversal del haz de láser. La transmisión de la imagen se puede realizar a través de canales formados en el medio bajo la acción de la radiación del láser y que tienen una abertura numérica y una capacidad de autoenfoque locales equivalentes a la distribución de la intensidad dentro del haz de rayos.

2. RESUMEN HISTORICO

Actualmente la materia básica para fabricación de elementos de fibras es el vidrio. Uno de los procedimientos tecnológicos universales

para la fabricación de guías de luz consiste en estirar el vidrio ablandado. Las guías de luz modernas consisten en una fibra do vidrio conductora do luz con un alto inidice de refracción, rodeada de una capa aisladora también de vidrio, pero con un índice de refracción bajo. Al incidir los rayos de luz en la superficie de separación de dos medios se observa una reflexión interna total si los rayos que inciden en la superficio de separación vienen del medio que tiene un alto índice de refracción. Los rayos que inciden de la cara sobre el conducto do luz, experimentan en las guías de luz múltiples reflexiones internas totales en la frontera conducto— capa aisladora y se propagan por la guía de luz.

En la profundidad de los siglos. La propagación de la luz en barras transparentes por medio de múltiples reflexiones totales internas, por lo visto, se conocía desde hace mucho tiempo. Es muy probable que los antiguos artesanos observaran este fenómeno y lo utilizaran en la fabricación de piezas para decoración. Así, en los artículos multicolores de lujo antiguos, el elemento decorativo en la masa del vidrio de base eran pedazos de vidrio de colores dispersados en forma desordenada. En la elaboración de filigranas de vidrio, cuyos autores son los artesanos venecianos, los elementos decorativos son fibras blancas o de color que forman dentro del vidrio básico dibujos, a veces muy complicados, pero siempre correctos.

El procedimiento de estirar el vidrio en forma de fibras, barras y bandas el hombre lo conocía desde tiempos inmemoriables, probablemente antes que los otros métodos de tratamiento del vidrio. Los collares y vasijas antiguos decorados con fibras y bandas, y la fabricación de artículos multicolores en Egipto mu-

chos centenares de años antes que en Venecia, permiten afirmar que los antiguos artesanos sabían elaborar del vidrio reblandecido los semifabricados necesarios. El vidrio reblandecido se puede estirar según sea su viscosidad en forma de fibras muy delgadas, barras o bandas y mientras el vidrio permanezca líquido, las fibras no se rompen a menos que se aplique un esfuerzo especial. Se sabe que M. V. Lomonósov definía el vidrio como un material que se podía estirar en fibras delgadísimas.

Para la fabricación de fibras y barras, los antiguos artesanos utilizaban procedimientos sencillos, que no exigían un equipo complicado: estiraban la fibra directamente del crisol con vidrio derretido con ayuda de una varilla de hierro. Puesto que el hierro no se «humedece» al contacto con el vidrio líquido ni se funde con éste si su temperatura es menor de 500—600° C, tomaban una varilla de hierro con uno de sus extremos previamente calentado hasta el rojo incandescente, la sumergían en vidrio fundido y luego la sacaban, estirando al mismo tiempo el vidrio que se adhería a la varilla en forma de fibras o de barritas. Para obtener una barrita gruesa, utilizaban vidrio fundido más espeso y viscoso. La varilla de hierro, utilizada por los antiguos artesanos, fue la antecesora de la herramienta, mencionada por los autores de la edad media y que se emplea actualmente.

En otro método de producción de las fibras, un pedazo de vidrio se calentaba en una fragua, semejante a la de una herrería, y se sometía luego al estiramiento. Los egipcios utilizaban estas fraguas principalmente para trabajar los metales. Son conocidas ampliamente las fotografías de los frescos en la tumba de la dinastía XII en Beni-Hasan (Egipto). En estas fotografías están representados unos artesanos, avivando con tu-

bos el fuego de la fragua. En ésta se calentaba un pedazo de vidrio, después de su ablandamiento le unían varillas de hierro y lo estiraban en diferentes direcciones en forma de fibras de cualquier longitud y espesor.

Este método de estirar el vidrio se utilizaba también en la fabricación de collares. Para esto, del vidrio fundido que se encontraba en el crisol formaban barras delgadas. Estas últimas se ablandaban en un horno o en la fragua y se arrollaban en un pedazo de alambre de cobre hasta formar un pedacito de vidrio del tamaño requerido. Algunos científicos opinan que los maestros antiguos, antes de que idearan el método de soplar el vidrio, elaboraban los tubos de vidrio (huecos) mediante un procedimiento semejante al método de fabricar collares, es decir, enrollando fibras o cintas de vidrio en un alambre de cobre o en un núcleo de cerámica.

El método de estirar fibras y barras de vidrios ablandados junto con otros pocedimientos tecnológicos se utilizó en la fábrica de vidrio de Ust-Ruditsky a mediados del siglo XVIII para la producción de «vidrio hilado». Dicha fábrica fue construida por iniciativa y bajo la dirección de M. V. Lomonósov. La figura 1 representa a un maestro estirando un pedazo de vidrio reblandecido con ayuda de dos varillas. Otras dos barras se encuentran en el horno calentándose. Esta imagen simbólica del proceso del alargamiento del vidrio figuraba en el «Certificado de donación» otorgado por Elizaveta Petrovna a M. V. Lomonósov como propietario de las tierras en el distrito de Koporsk en la provincia de Petersburgo (cerca de la moderna ciudad de Lomonósov).

Los dibujos en el certificado fueron hechos bajo la dirección de M. V. Lomonósov. M. V. Lomonósov fabricaba sus célebres y brillantes



FIG. 1. Estiramiento de «vidrio hilado»

mosaicos de «un mosaico estirado», es decir, de barras estiradas de sección poligonal. Después de estirar las barras, éstas se cortaban en pedazos de dimensiones determinadas y se fijaban con cemento. El mosaico estirado se hacía de vidrio, cuya composición era elaborada por el mismo M. V. Lomonósov. Aunque ya han pasado más de 200 años, sus mosaicos conservan hoy día frescura y brillantez de los colores.

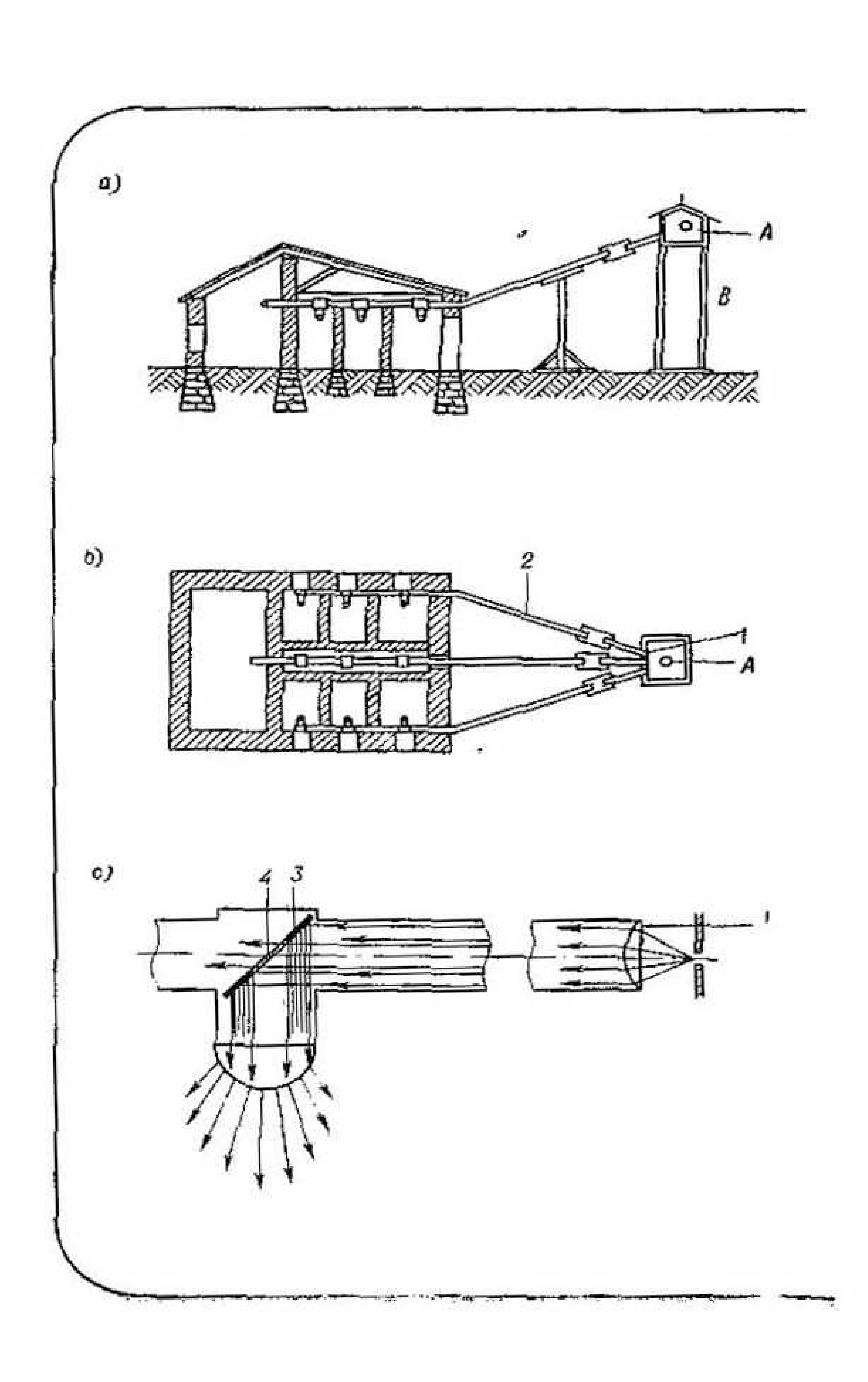
De lo expuesto se puede concluir que la óptica de fibras no apareció ni empezó su desarrollo en el vacío. Esto es justo por lo menos en lo que respecta a los procedimientos tecnológicos de estiramiento de fibras y barras de vidrio

reblandecido, y en cuanto a los mosaicos de M. V. Lomonósov, éstos pueden considerarse como un lejano prototipo de las estructuras de mosaico de los elementos de fibra modernos.

Etapas y tendencias fundamentales del desarrollo de la fibroóptica. En la historia del desarrollo de la técnica de la conducción de la luz — de la fibroóptica—, se pueden observar varias etapas y tendencias.

Guías de luz huecas. La posibilidad de realizar guías de luz, es decir, dispositivos para la transmisión de la luz a distancia por un canal recto o curvo, fue planteada primeramente por el ingeniero ruso V. N. Chikolev en los años sesenta del siglo pasado. Ya en el año 1874, él iluminó cuatro locales de un almacén con un arco de carbón. En aquel entonces no existían aún las económicas bombillas eléctricas de poca potencia. «De cada fuente de corriente eléctrica, cualquiera que fuese su intensidad, obteníamos una sola fuente de luz» —escribió V. N. Chikolev. En 1876 utilizó la transmisión de la luz en guías para alumbrar los depósitos de la fábrica de Ojtinsk, la mayor fábrica de pólvora de aquel tiempo, por medio de arcos de carbón, situados fuera del local de los explosivos. Las guías de luz de Chikolev eran tubos metálicos huecos con superficie interna especular. El rayo de luz, gracias a las reflexiones en la superficie interna del tubo, se propagaba por la guía de luz y salía del extremo opuesto.

El sistema de alumbrado de V. M. Chikolev funcionaba según el siguiente principio: una fuente de luz con intensidad de unas 3000 cd (fig. 2) colocada en un faro de vidrio *A* en la torre *B* iluminaba los alrededores y el edificio. La luz era dirigida hacia el edificio con ayuda de tres lentes convergentes *1*, que enviaban luz a través de tres tubos de hojalata *2*. A lo largo



a)
A
B
b)
2
1
A
c)
4
3
1

del tubo guía de luz, la luz llegaba hasta el primer espejo *3*, cuya capa plateada se depositaba tan sólo en la periferia de la lámina de vidrio y reflejaba parte de la luz. La luz se dispersaba en el local por medio de una semiesfera mate. Los rayos que pasaban a través del vidrio transparente *4* seguían por la guía de luz hasta el siguiente espejo. V. N. Chikolev propuso también una serie de aplicaciones diferentes de las guías de luz, entre ellas la iluminación de las amplias candilejas de un teatro con una bujía de Yáblochkov. Es interesante anotar que además de las guías de luz de sección constante, Chikolev propuso utilizar guías de luz de sección variable.

En el año 1878 el inglés Thomson, posiblemente sin tener conocimiento de los trabajos de V. N. Chikolev, expresó la idea sobre las ventajas del fraccionamiento de la luz eléctrica. Los norteamericanos Mollier y Tsibrin en 1879 describieron el principio de transmisión de la luz. Acerca de esto V. N. Chikolev, escribió: «En el número de Julio de 1879 la revista «Scientific American» trae un dibujo de la canalización de luz eléctrica, según parece ideado por los señores Mollier y Tsibrin en Norteamérica. Es muy posible que ellos no estuvieran enterados de mis experimentos (hay algunas pruebas de esto) en Rusia, pero los respetables norteamericanos han exagerado tanto que para mí es completamente claro que ellos nunca realizaron experimentos de canalización».

←—

FIG. 2. Alumbrado de talleres de pólvora con guías de luz según el proyecto de V. N. Chikolev: *a* — estructura general; *b* — plano de la instalación; *c* — principio de funcionamiento del bloque de dispersión de luz:
1—lentes convergentes; *2*—guías de luz huecos; *3*—superficies especulares; *4*—vidrio transparente

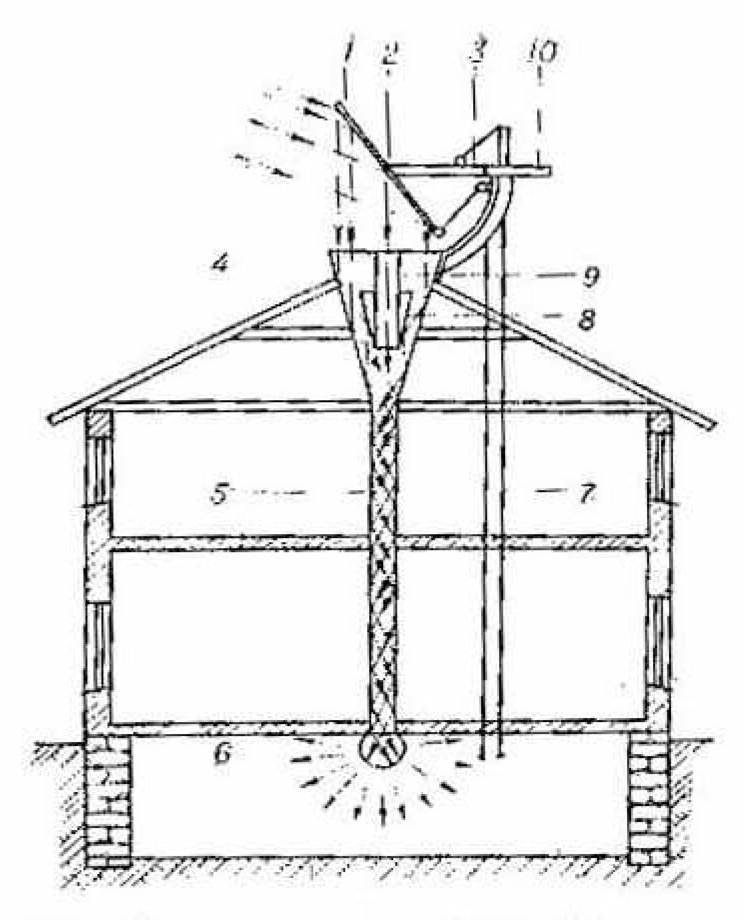


FIG. 3. Dispositivo para alumbrar sótanos con la luz de sol

1—espejo; *2*—eje de rotación del espejo; *3*—soporte que sujeta el espejo; *4*, *8*, *9*—sistema de la guía de luz cónica; *5*—tubo; *6*—semiesfera mate; *7*—cuerdas para girar el espejo; *10*—eje de rotación del soporte

Más tarde, las guías de luz de V. N. Chikolev encuentran aplicación en trabajos de otros ingenieros. Así, en 1901 O. B. G. Ganneborg y en 1913 S. Bozhilov elaboraron dispositivos para la iluminación de sótanos por medio de rayos solares concentrados que se transmitían desde el tejado a través de un tubo con la superficie interna especular (Fig. 3). Los rayos solares, después de reflejarse en el espejo 1, eran dirigidos hacia la guía de luz hueca de forma cónica *4* con el tubo central cilíndrico *9* y los espejos complementarios *8* que dirigían los rayos al tubo *5*. La guía de luz cónica *4* concentra

la radiación solar en la cara de entrada de la guía de luz hueca. Los rayos después de experimentar reflexiones múltiples llegan hasta la semiesfera mate que ilumina el local. La idea de V. N. Chikolev sobre la canalización de la luz desarrollada por O. Ganneborg revela las posibilidades básicas del empleo de las guías de luz en la heliotecnia para le concentración y transmisión a distancia de la energía solar.

Las pérdidas de luz en las guías de luz huecas se determinan fundamentalmente por el número de reflexiones que experimentan los rayos; por esta razón, V. N. Chikolev trataba de disminuir el número de reflexiones de los rayos en las paredes de las guías de luz. Él tuvo que utilizar tubos de diámetros relativamente grandes y lentes de bajo poder. Lo voluminoso de las guías de luz huecas, la baja transparencia para flujos luminosos de gran apertura y las grandes longitudes, así como la necesidad de grandes superficies metálicas con altos índices de reflexión fueron la causa de la poca divulgación de las guías de luz de V. N. Chikolev. Sin embargo el interés hacia éstos no ha disminuido. Así, ya en los años sesenta de nuestro siglo, los científicos soviéticos V. K. Baránov, V. V. Nóvikov, D. M. Krupp, A. R. Daich, Yu. A. Tsirlin, L. E. Pargamanik y muchos otros realizan investigaciones sobre las características luminotécnicas fundamentales de las guías de luz huecas. Estos últimos encuentran una serie de interesantes aplicaciones en los trabajos de los científicos soviéticos I. B. Keirim, Z. P. Lisitsin (1957), del francés Coehn (1955), de los científicos norteamericanos Okhlaman, Richards, Tinkham (1958) y de muchos otros.

Guías de luz líquidas. La propagación de la luz por medio de reflexiones totales internas

FIG. 4. Esquema del experimento de la propagación de la luz por el chorro de agua

→

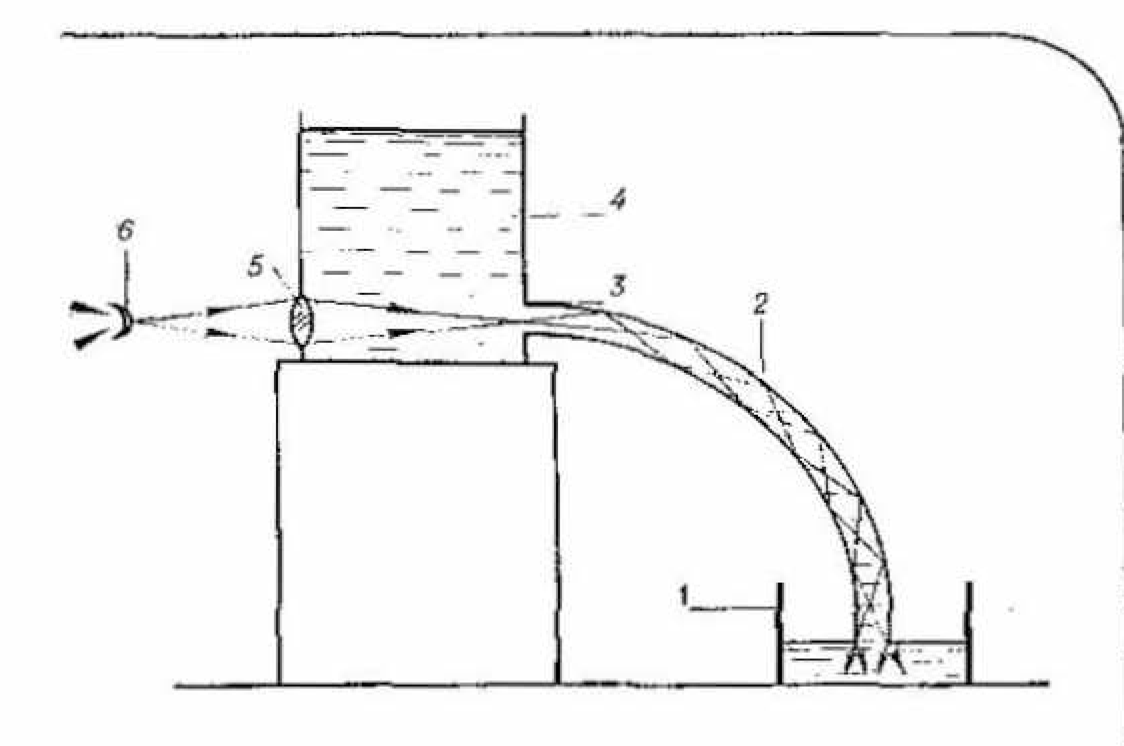
la demostró por vez primera Tyndall en la Real Sociedad de Inglaterra en el año 1870. En el experimento de Tyndall, del grifo *3* (fig. 4) colocado en la parte inferior del recipiente *4*, el agua que llena el recipiente fluye en forma del chorro continuo *2* y no diverge en todo su recorrido hasta llegar a la vasija *1*. En la pared del recipiente opuesta al grifo se coloca la lente *5*, que enfoca el haz luminoso del arco de carbón *6* colocado fuera del recipiente. La luz se propaga por el chorro de agua gracias a las múltiples reflexiones internas totales que experimentan los rayos en la frontera agua— aire. Debido a la dispersión de la luz y las irregularidades de la superficie del chorro, en los experimentos de Tyndall se destruye la condición para la reflexión interna total y el chorro se ilumina en toda su longitud. Semejante guía de luz «líquida» está representada en la fotografía de la fig. 5.

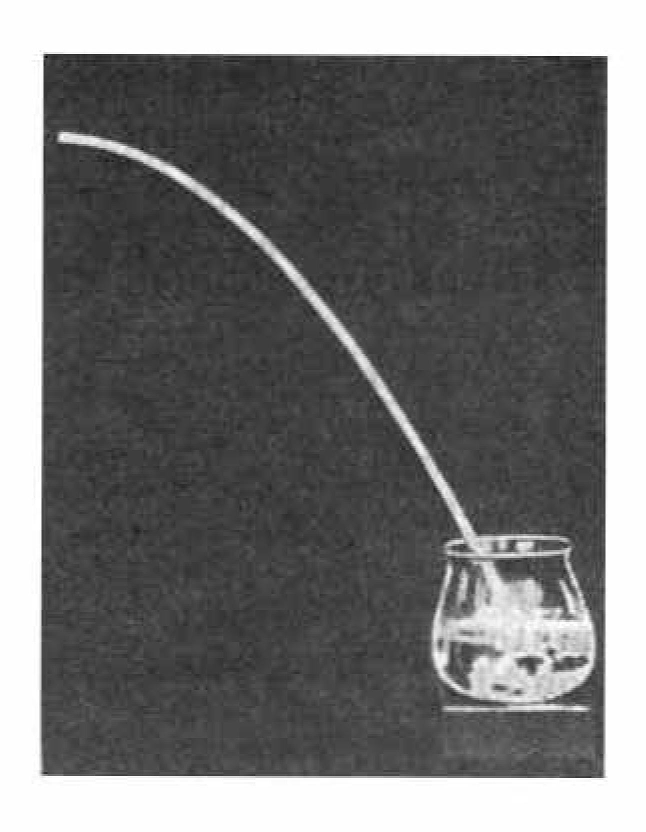
El principio de las guías de luz líquidas hoy en día se utiliza ampliamente en las fuentes, por ejemplo, en la iluminación de los chorros de los surtidores a través de una tobera, especialmente cuando se emplea una iluminación a colores variable. Mediante este método de iluminación brilla tan sólo el chorro, formando un gran contraste con el fondo oscuro que lo rodea.

Guía de luz sólida y transparente. Se menciona por primera vez en 1905 en la «Física óptica» de R. Wood, donde el autor escribe: «es posible llevar la luz de un punto a otro sin grandes pérdidas de energía, utilizando la re-

→

FIG. 5. Demostración de una guía de luz líquida


6
5
4
3
2
1



flexión interna en las paredes de una barrá de vidrio o, mejor todavía, cuarzo fundido».

A principios del presente siglo en Alemania se realizaron investigaciones sobre la propagación de ondas electromagnéticas a través de guías de luz transparentes. En 1920, O. Schriver hizo una síntesis de estos trabajos analizando los resultados más importantes. W. Bragg en 1931, en su libro «En mundo de la luz» escribe que la propagación de la luz por medio de múltiples reflexiones totales internas «en una barra de vidrio curvada se utilizan como guía de luz para la transmisión del haz luminoso que ilumina los objetos bajo el microscopio». En 1936, el científico soviético A. M. Jalfin propuso el empleo de guías de luz curvadas de diámetro variable para lograr una realimentación luminosa en un amplficador fotoeléctrico.

En 1949, V. V. Nóvikov, en su comentario al libro «Obras escogidas» de Chikolev, escribe que el princip̃o de la canalización óptica se recomienda ampliamente en la actualidad para la iluminación con luz disimulada de aparatos en los tableros no iluminados. Como canal para el flujo luminoso puede servir el cuerpo del semianillo de vidrio *1* (fig. 6), por uno de cuyos extremos entra el flujo luminoso de la bombilla pequeña *2*. Para evitar la dispersión, en el trayecto inicial *3* del canal se aplica un recubrimiento especular. La parte restante del canal del lado de la escala tiene una superficie mateada; el espesor del mateado aumenta a medida que se aleja de la bombilla. Esta superficie, al dispersar la luz, ilumina bien la escala.

En 1946 Karrer y Orrt y en 1957 B. F. Diky y B. P. Ivâshchenko utilizan una guía de luz transparente y curvada para la elaboración de fotorrefractómetros altamente sensibles.

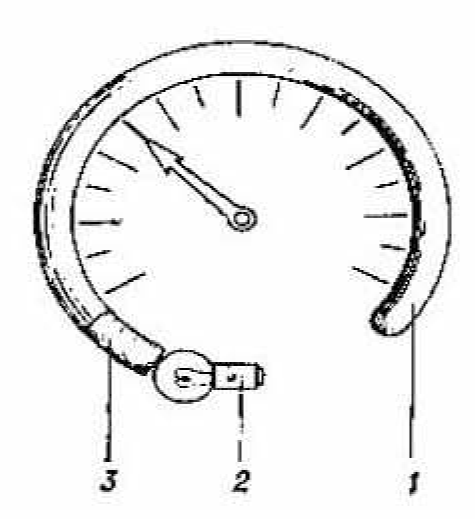


FIG. 6. Iluminación de las escalas de aparatos según el método de canalización óptica por un anillo de vidrio

En nuestro país actualmente se fabrican veladores elegantemente adornados en forma de lirio, cuyos pétalos son guías de luz hechas de metilmetacrilato incoloro, iluminadas a través de filtros de luz verdes y rosadas por una bombilla miniatura, colocada junto con el transformador en la base del candil. Los pétalos se alumbran uniformemente y ofrecen una iluminación nocturna muy suave.

En todos los trabajos enumerados se utilizan guías de luz monofilares que no tienen ninguna capa. El papel de capa reflectora lo desempeña el aire alrededor de la guía de luz.

Guías de luz multifilares. El fenómeno demostrado por Tyndall, las guías de luz huecas empleadas con éxito por Chikolev y las guías de luz transparentes descritas por Wood condujeron en 1927 a Braid en Inglaterra y a Hanzel en EE.UU. a la idea de utilizar un gran número de fibras en televisión para la transmisión y exploración de imágenes. La transmisión de una imagen con ayuda de un cordón de fibras colocadas regularmente fue realizada por primera vez en 1930, en el experimento de Lamm (Alemania), quien demostró en un haz de fibras de cuarzo de 40 μ de

diámetro la propiedad fundamental de un haz regular de guías de luz transparentes de transmitir la luz y las imágenes a distancia. Más tarde aparecieron las proposiciones de Goldsmith (1944), Reynen (1946), Jordan y Bell (1949) y de otros científicos, referentes a la utilización de cordones de fibras de vidrio para la transformación de una imagen óptica.

Sin embargo, todos estos resultados y proposiciones de los experimentos de Lamm no encontraron una aplicación práctica debido a la falta de tecnología para fabricación de artículos de fibras y, en particular, de las guías de luz: elemento inicial y fundamental de cualquier pieza de fibras. Hasta el año 1951 no se realizó ningún estudio en cuanto a la tecnología de la óptica de fibras. La única excepción la constituye el trabajo de Sawtler, quien trató en los años 1911—1912 de obtener fibras compactas y delgadas de una varilla y fibras capilares, de tubos. La varilla o el tubo se colgaban en el centro del horno y con ayuda de una pesa sujeta al extremo inferior de dicha pieza, se estiraba la fibra. Para disminuir la velocidad de caída, la pesa tenía forma de plato y se introducía en glicerina.

En 1951 comienza una nueva etapa en el desarrollo de la óptica de fibras, cuando Van Hill en Holanda y Kapany y Hopkins en Inglaterra independientemente uno de otro empezaron sus trabajos encaminados a crear gastroscopios de fibras flexibles, y a investigar las leyes de la transmisión de imágenes a través de haces regulares de fibras flexibles de vidrio. Ya los primeros experimentos con haces de fibras plantearon dos problemas tecnológicos fundamentales: la necesidad de un aislamiento luminoso de las fibras conductoras de luz elementales unas respecto de otras y de un embalaje o tendido

compacto y regular de éstas en un haz. Esto se explica de la siguiente manera. Si se acorcan dos fibras transparentes hasta una distancia aproximadamente igual a la mitad de la longitud de onda de la luz que en ellas se propaga, habrá una fuga de luz de una fibra a otra. La filtración de la luz aumenta al disminuir el diámetro de las fibras, puesto que al colocarlas una cerca de otra, el área de su contacto «óptico» aumenta. La filtración cruzada de la luz que aparece en este caso constituía un serio problema: los haces de fibras reales transmitían la imagen con un contraste muy bajo.

El mayor mérito de Van Hill estriba en la solución del problema del aislamiento luminoso de las fibras guía de luz. En 1953 él elaboró fibras de vidrio en una *capa plástica* aisladora de la luz con un índice de refracción de 1,47. La idea de Van Hill, orientada a eliminar la filtración cruzada de la luz consistía en aislar las fibras entre sí, recubriendo cada una de éstas con una capa delgada de un material transparente que poseía un índice de refracción menor que el del material de la fibra. En los años 1958—1959, dicha idea fue perfeccionada por Kapany y Hirschowitz. Estos científicos elaboraron fibras de vidrio en una *envoltura* aisladora de luz también *de vidrio* con un índice de refracción bajo. En estas fibras, las pérdidas de luz son menores que en las fibras en capa de plástico.

Aparece así otro aspecto positivo de la envoltura: protege a la superficie pulida (reflectora) de la fibra contra la acción mecánica externa, puesto que para minimizar las pérdidas de luz debidas a las múltiples reflexiones internas, las paredes laterales de cada fibra deben estar siempre lisas y limpias. El espesor mínimo necesario de la capa aisladora de luz es igual a la longitud de onda de la radiación transmitida,

es decir, cerca de 0,5—1,0 μ. Con los trabajos de Von Hill, Kapany y Hirschowitz quedó resuelto el problema del aislamiento luminoso de las guías de luz. Las fibras de vidrio en una capa de vidrio aisladora de la luz también hoy en día continúan siendo un elemento fundamental de cualquier pieza de fibras.

La solución del problema de un tendido compacto y regular de las fibras de un haz resultó más complicado. En la etapa inicial del desarrollo de la óptica de fibras se elaboraron procesos de fabricación de piezas flexibles a partir de fibras monofilares. Por ejemplo, en 1954 Kapany en EE. UU. con fibras de un diámetro igual a 50 μ, hizo un haz flexible con un poder resolutivo de 4 líneas/mm en lugar de las 10 líneas/mm teóricas. El poder resolutivo real de las piezas de fibras hasta 1960 era todavía bajo (cerca de 5—10 líneas/mm), aunque ya en 1951, Van Hill, Kapany y Hopkins obtuvieron fibras elementales de 10 μ de diámetro, las cuales mediante un tendido compacto y regular podrían dar un poder resolutivo de cerca de 50 líneas/mm. Esto se explica por la dificultad excepcional de un tendido o embalaje de las «impalpables» fibras delgadas de 5—15 μ de diámetro.

De esta manera, el segundo de los problemas tecnológicos arriba indicados se convirtió de hecho en el problema de obtener elementos de fibras de alto *poder resolutivo*.

Un gran mérito tanto del científico soviético V. B. Veinberg como del especialista norteamericano Kapany lo constituye el hecho de haber elaborado, independientemente uno del otro en los años 1959—1961, una tecnología de fabricación de *guías de luz monofilares «palpables»*. Por ejemplo, una guía de luz de 1 mm de sección contenía varios miles de filamentos

guías de luz elementales (unitarios) de algunos micrones de diámetro, cada uno de las cuales estaba rodeada de una capa aisladora de luz. Debido a la mayor palpabilidad de las guías de luz multifilares, se simplificó la solución del problema del tendido compacto y regular y la constitución multifilar de esta guía de luz (es decir, la pequeñez de la sección de cada filamento) permitió obtener elementos de fibras con un alto poder resolutivo. El método de Veinberg—Kapany hizo posible la fabricación de ventanas de fibras herméticas al vacío sinterizadas, de alto poder resolutivo para los dispositivos electrónico-ópticos, y actualmente es el método más conocido y más ampliamente utilizado para la fabricación de haces regulares de fibras rígidos y flexibles con un poder resolutivo hasta de 80—100 lín/mm. En más de un 96% de las empresas soviéticas y extranjeras que se dedican a la tecnología o producción de elementos de la óptica de fibras, se utiliza básicamente el método de Veinberg—Kapany para la fabricación de guías de luz multifilares y de fibras.

Resumiendo lo expresado anteriormente, cabe señalar que en el desarrollo de la técnica de las guías de luz se han observado tres direcciones fundamentales:

1) construcción de aparatos a base de las guías de luz huecas: guías de luz de V. N. Chikolev (su desarrollo empezó aproximadamente a partir de 1870);

2) las guías de luz monofilares transparentes sin recubrimiento para la transmisión de radiación (empezaron a desarrollarse aproximadamente desde 1900);

3) la fibroóptica como un haz regular de fibras guías de luz transparentes, cada uno de los cuales tiene su capa aisladora de luz (empe-

zó a desarrollarse desde 1927, y su realización tecnológica empieza aproximadamente a partir de 1960).

3. ESTADO ACTUAL DE LA OPTICA DE FIBRAS

La iniciación de la etapa moderna de la óptica de fibras puede considerarse el año 1960. Es el año de la realización tecnológica de los primeros elementos de fibras con características aceptables—transparencia de la luz, poder resolutivo, dimensiones y algunas otras— para su utilización en la construcción de aparatos. Esto condujo a un apresurado desarrollo de la construcción de aparatos y, consecuentemente, a un crecimiento brusco de la necesidad de nuevos artículos de fibras. Basta con decir que de la producción de la fibroóptica y de los dispositivos basados en ésta, están ocupadas actualmente más de 50 empresas en EE.UU., Japón, Inglaterra, RDA, Checoslovaquia, Hungría, RFA, Francia, Suiza y en otros países. Numerosos trabajos en la esfera de la fibroóptica se llevan a cabo también en la Unión Soviética. A escala mundial actualmente se fabrican cerca de 3 000 tipos de piezas de fibras con más de 500 nombres. La mitad de éstas corresponde a los propios elementos de fibras y la otra mitad la constituyen dispositivos a base de la óptica de fibras. Hoy día los elementos de fibras se emplean en la fabricación de aparatos médicos, en los instrumentos electrónico-ópticos y en los de medida, en los dispositivos de televisión y acústicas, en los sistemas fototelegráficos, holográficos, telemétricos, óptico-mecánicos, cibernéticos, de láser y en las investigaciones nucleares.

Un futuro desarrollo efectivo de la construcción de aparatos médicos, cósmicos, ópti-

co-mecánicos y electrónico-ópticos es inconcebible sin la utilización de los elementos de la óptica de fibras.

Esta amplia utilización de la óptica de fibras en la construcción de aparatos planteó nuevos problemas. Nuevas y complicadas tareas surgieron ante los diseñadores de la tecnología de fabricación de los elementos de fibras y en la creación de métodos precisos de control de calidad en el proceso y después de su elaboración. Se ha planteado una aguda necesidad de investigar detalladamente las leyes de propagación de la radiación a través de guías de luz monofilares y de un haz de fibras tanto desde el punto de vista de la óptica geométrica como de la ondulatoria. La construcción de aparatos a base de la óptica de fibras exigió la elaboración de nuevos materiales ópticos para la fabricación de elementos de fibras. La complejidad de los problemas se debe no solamente a las dificultades en la fabricación de fibras altamente transparentes con aislamiento luminoso, sino también a la necesidad de su distribución en el espacio estrictamente determinada.

Para caracterizar la etapa actual detengámonos tan sólo en la descripción de algunos trabajos en las direcciones fundamentales de la óptica de fibras.

Óptica de las guías de luz. El conocimiento de la óptica de las guías de luz monofilares y multifilares es necesario para los diseñadores de la tecnología de fabricación de los métodos y equipos de control e investigación de los elementos de fibras como también para los diseñadores de aparatos a base de la fibroóptica y de materiales para ésta. Por esta razón, después de 1960 los especialistas en la fibroóptica empezaron a prestar gran atención al estudio de la óptica de las guías de luz.

En la última década, los científicos soviéticos y los especialistas norteamericanos investigaron teórica y experimentalmente la transmisión de diversos tipos de ondas en fibras de diámetro pequeño y los fenómenos de enlace de guías de luz en las fibras vecinas.

Una serie de investigaciones de las leyes generales de propagación de la radiación a través de las guías de luz desde el punto de vista de la óptica geométrica fue realizada por los científicos soviéticos y norteamericanos. Los soviéticos terminaron las investigaciones sobre la teoría de la propagación de la luz en guías de luz y sobre las propiedades de los elementos de fibras: transmisibilidad luminosa, dispersión, poder resolutivo, características frecuencia—contraste, penetración de la radiación en la capa aisladora de fibras y concentración de la radiación.

En este grupo señalemos las investigaciones teóricas y experimentales de la propagación de la luz en guías de luz considerando no solamente los rayos meridionales sino también los inclinados.

Es notorio que el llamado «efecto de borde», que revela las leyes de la propagación de los rayos inclinados en las guías de luz, fue descubierto y publicado en 1961 por V. B. Veinberg, D. K. Sattárov y Potter independientemente uno del otro.

En el lapso 1961—1965, los científicos soviéticos calcularon con ayuda de computadoras de acción rápida la transmisibilidad luminosa de las guías de luz rectilíneas, curvas y cónicas con caras rectas e inclinadas en función de la abertura numérica de los haces luminosos y de las características de los materiales de la guía de luz y de su capa. Los valores encontrados coinciden bien con los medidos. Se ha de-

mostrado que las pérdidas en las guías de luz en cada reflexión interna generalmente se encuentran entre los límites, 0,001—0,0001%.

En la URSS en el año 1965 fueron descubiertos e investigados un nuevo fenómeno de la transmisión transversal de la información organizada en los elementos de fibras y «el efecto de los tres anillos», que revela las leyes de la propagación de la radiación y de la transmisión de imágenes a través del haz de guías de luz. El efecto de los tres anillos es la base de la óptica geométrica del haz de guías de luz.

Tecnología de la óptica de fibras. En la última década, en la URSS y en los EE.UU. se han elaborado las bases de la tecnología de fabricación de diferentes elementos de fibras: rígidos y flexibles, que transmiten imágenes con transformación y sin ella, pasivos y activos, así como transparentes en diferentes regiones del espectro. Los elementos de fibras realizados en los últimos diez años son extraordinariamente variados: finísimas agujas para una microinyección luminosa de los elementos del núcleo de una célula viva, haces flexibles para los endoscopios médicos y técnicos, guías de luz rígidas para la microscopia fluorescente de contacto, ventanas frontales de fibras herméticas al vacío para los dispositivos de haces electrónicos, lentes de fibras correctores de la curvatura de la imagen de los objetivos de lentes y especulares, colectores de toda clase, conmutadores, convertidores de exploración y de codificación para los diferentes tipos de dispositivos.

Acerca del desarrollo de la óptica de fibras en determinado país, generalmente, se puede juzgar por la elaboración de discos de fibras herméticos al vacío y de haces regulares de fibras flexibles para la transmisión de una imagen. En la URSS y en los EE.UU. independiente-

mente, han sido ideados discos de fibras herméticas al vacío con un diámetro hasta de 160 mm con un poder resolutivo de hasta 100 líneas/ mm para la construcción de aparatos electrónico-ópticos. El número de filamentos elementales conductores de luz en estos discos se acerca a los mil millones.

En los EE.UU. se han elaborado haces regulares flexibles de fibras con un poder resolutivo de 45 líneas/mm. En la URSS semejantes haces tienen un poder resolutivo hasta de 80 líneas/mm.

En la URSS han sido diseñados modelos experimentales de sistemas fibrosos rígidos completamente reversibles, de piezas que contraen la imagen en una dirección (anamorfosis), lentes plano-cóncavos y bicóncavos para la corrección de la curvatura de las imágenes ópticas y electrónicas y muchos otros aspectos de los elementos de fibras. Ha sido elaborada una gran rama de pares y triples de vidrios ópticos para la fabricación de piezas de fibras.

Metodología del control de los elementos de fibras. En la URSS y en el extranjero se ha realizado un gran volumen de trabajos sobre la elaboración de una metodología y de los aparatos de control e investigación de los elementos de fibras en el proceso y después de su fabricación: detectores del diámetro y de la tensión, métodos originales para medir la temperatura del vidrio durante la formación de los elementos de fibras, metodología de control de muchos parámetros tecnológicos que determinan la calidad de los artículos, instalaciones para la medición de todas las características ópticas de las piezas de fibras y su hermeticidad al vacío, así como otros muchos estudios.

La necesidad de elaborar una metodología especial de control se explica tanto por lo específico del proceso tecnológico de fabricación de artículos de fibras como por las peculiaridades de las leyes de transporte de la radiación y de la imagen a través de los sistemas guías de luz.

Construcción de aparatos a base de óptica de fibras. Enumerar todos los tipos de dispositivos en los cuales actualmente se emplean elementos de fibras es prácticamente imposible, puesto que esto nos daría una lista interminable. Por eso mencionemos sólo algunas tendencias de la construcción de aparatos.

En la URSS, EE.UU. y otros países se han elaborado aparatos óptico-electrónicos con óptica de fibras. Así, las piezas de fibras son empleadas en la técnica electrónica para la unión de cascadas en los amplificadores de imagen, en calidad de ventanas frontales en los tubos de rayos catódicos como ventana de un vidicón y para diferentes tipos de convertidores de exploración, así como en los sistemas de fotocopia.

Una rama interesante, en la que se aplica la óptica de fibras es la medicina. Ya han sido creados y continúan creándose diferentes tipos de aparatos médicos destinados a la gastroscopia, bronquiscopia, rectoscopia, citoscopia y otros. Se elaboran sondas subcutáneas de fibras, oxímetros para la investigación de la saturación de oxígeno de la sangre en el corazón humano, coaguladores de láser en los que se emplean endoscopios de fibras para el tratamiento a distancia de los tejidos de los órganos internos y las fibras de centelleo para la radiología. En la URSS ha sido construido un laringoscopio original y tanto en la URSS como en Japón y los EE.UU. se han construido gastroscopios de fibras.

En diferentes países se realizan trabajos referentes a la expansión de las características espectrales de la óptica de fibras a las regiones infrarroja (hasta 14—15 μ) y ultravioleta (hasta 0,220 μ) del espectro, lo que abre amplias posibilidades para la elaboración de nuevos dispositivos con características de gran eficacia. Como amplificadores de luz se utilizan los láseres de fibras de vidrios con adición de neodimio.

Las fibras multifilares flexibles con una sección transversal de forma cuadrática o rectangular elaboradas en la URSS encontraron una amplia aplicación en la fabricación de diversos convertidores de exploración y de codificación. Por ejemplo, desde el año 1966, funcionan sin desconectarlos los convertidores de fibras de cuatro líneas en un transductor de televisión, realizando exitosamente medidas de longitud de laminados en caliente con precisión de ±0,2% en la fábrica metalúrgica de Cherepovets y en la fábrica Uralmash funcionan captadores del espesor del laminado a base de convertidores de fibras.

La construcción de aparatos en la URSS comprobó la efectividad excepcional de la utilización de diferentes elementos de fibras en una gran variedad de dispositivos destinados exclusivamente a las investigaciones científicas. Así, en la URSS se fabrican espectrógrafos de vacío y monocromadores con haces de fibras de diferentes construcciones.

En la URSS y en los EE.UU. se realizan investigaciones de dispositivos óptico-acústicos que separan un espectro dado de frecuencias audibles (septrones). El «corazón sensible» de estos dispositivos es un haz de fibras libres.

El desarrollo exitoso de las cuatro direcciones principales de la fibroóptica (la óptica de las guías de luz, la tecnología de fabricación,

la metódología de control y de investigación y la construcción de aparatos basados en la óptica de fibras) conduce al descubrimiento de nuevas posibilidades originales y altamente efectivas de la optotecnia. En los últimos años han aparecido tendencias de gran porvenir, como son la óptica cristalo-fibrosa catodoluminiscente (URSS), la fabricación de piezas de fibras a base de vidrio de una marca (URSS), el autoanudamiento de los haces del láser, es decir, la aparición en un medio inicialmente homogéneo de canales temporales conductores de luz; la transmisión de información organizada por fibras en sentido transversal (URSS); fibras autoenfocables Self-focusing (Japón); amplificadores multicanálicos de la luminosidad de la imagen, basados en los elementos activos de fibras en forma de una placa microcanálica, en la cual, en la superficie interna de cada canal hueco de diámetro 10—40 μ se aplica una capa de emisión secundaria. Ya se perfilan los contornos de la nueva técnica de las guías de luz —de la óptica de capas— como una de las modificaciones de la óptica de fibras, cuyas posibilidades y variedades son muy amplias, y las leyes de formación de la imagen no tienen análogos en la óptica clásica.

LA ÓPTICA DE LAS GUÍAS DE LUZ



Las leyes de la propagación de la luz a través de guías de luz monofilares (monofibrosas) y multifilares (multifibrosas), en los cuales el diámetro del filamento guía de luz es igual a varias longitudes de onda de la radiación que se propaga a través de ellas, pueden describirse correctamente a base de los principios de la óptica geométrica. Se puede demostrar que, incluso para explicar el complicado mecanismo de propagación de la luz a través de fibras de diámetro pequeño, utilizadas como guías de luz, se puede emplear la óptica geométrica con ciertas variaciones y complementaciones:

En el empleo de los elementos fibrosos para la fabricación de instrumentos, en la mayoría de los casos, el filamento sobrepasa varias veces

la longitud de onda de la radiación que se propaga a través de la guía de luz. Por esta razón, actualmente para describir el mecanismo de transmisión de la radiación a través de guías de luz y para calcular los parámetros ópticos de los elementos fibrosos elaborados, los tecnólogos y diseñadores utilizan la óptica geométrica.

Una guía de luz monofilar —filamento conductor de luz con alto índice de refracción, rodeado de una envoltura aisladora de la luz de un índice de refracción bajo— constituye el elemento básico de cualquier pieza fibrosa.

La característica óptica fundamental de una guía de luz monofilar de sección transversal y de construcción dadas es la transmisibilidad luminosa τ del haz de rayos cónico. Precisamente el τ de una guía de luz monofilar determina en gran parte no sólo la transmisibilidad luminosa de cualquier elemento fibroso, como por ejemplo un haz de guías de luz, sino también las leyes de la transferencia y formación de una imagen en la cara de salida de este último, sus características de contraste y de ruido, así como su poder resolutivo. La transmisibilidad luminosa τ de una guía de luz monofilar depende fundamentalmente de su abertura numérica, a través de la longitud del recorrido de los rayos en el filamento y del número de reflexiones que experimentan los rayos durante su propagación en la guía de luz así como también de la transparencia de los materiales del filamento y de la envoltura.

4. LA OPTICA DE LAS GUIAS DE LUZ SINGULARES

La radiación se propaga a través de la guía de luz gracias a las múltiples reflexiones internas totales que experimentan los rayos dentro

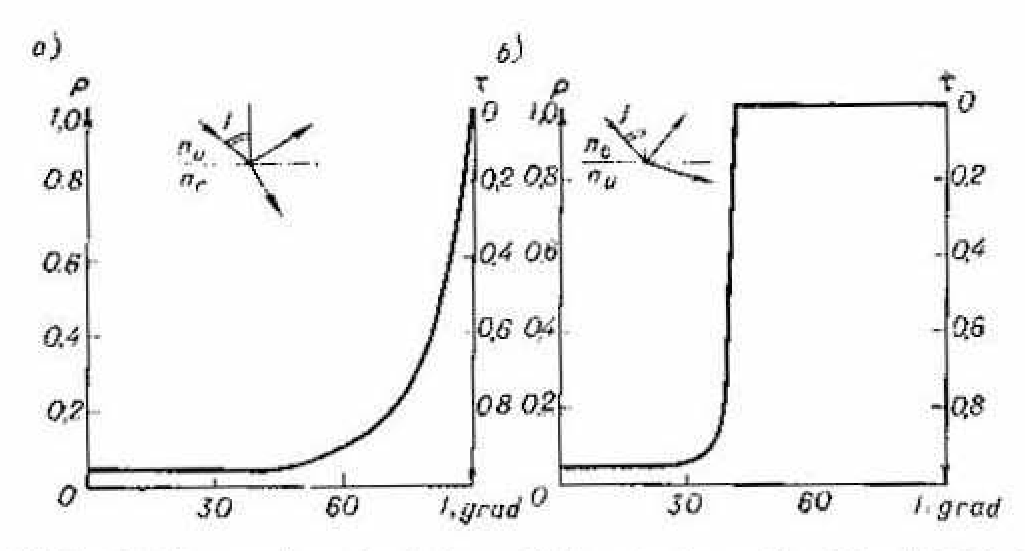


FIG. 7. Dependencia del coeficiente de reflexión del flujo de luz ρ en el primer medio y del coeficiente de transmisión τ del flujo en el segundo medio del ángulo de incidencia *j* del haz luminoso en la superficie de separación de los medios

del filamento que sirve como conducto de luz en la frontera de separación fibra—envoltura. El fenómeno de la reflexión total interna, ampliamente utilizado en la fabricación clásica de aparatos óptico-mecánicos, constituye en esencia la base de la acción y existencia de las guías de luz como elementos ópticos para transferencia de radiación a lo largo de un canal recto o curvo.

Reflexión total interna. Al incidir los rayos en la frontera de separación de dos medios, la energía luminosa se divide en dos partes: una parte se refleja mientras que la otra se refracta y penetra a través de la frontera de separación, en el segundo medio.

En la fig. 7, *a* se muestra la dependencia del coeficiente de reflexión de la luz ρ en el primer medio y del coeficiente de transmisibilidad τ de los rayos en el segundo medio del ángulo de incidencia *j* del haz luminoso en la superficie de separación en el caso de transferencia de la

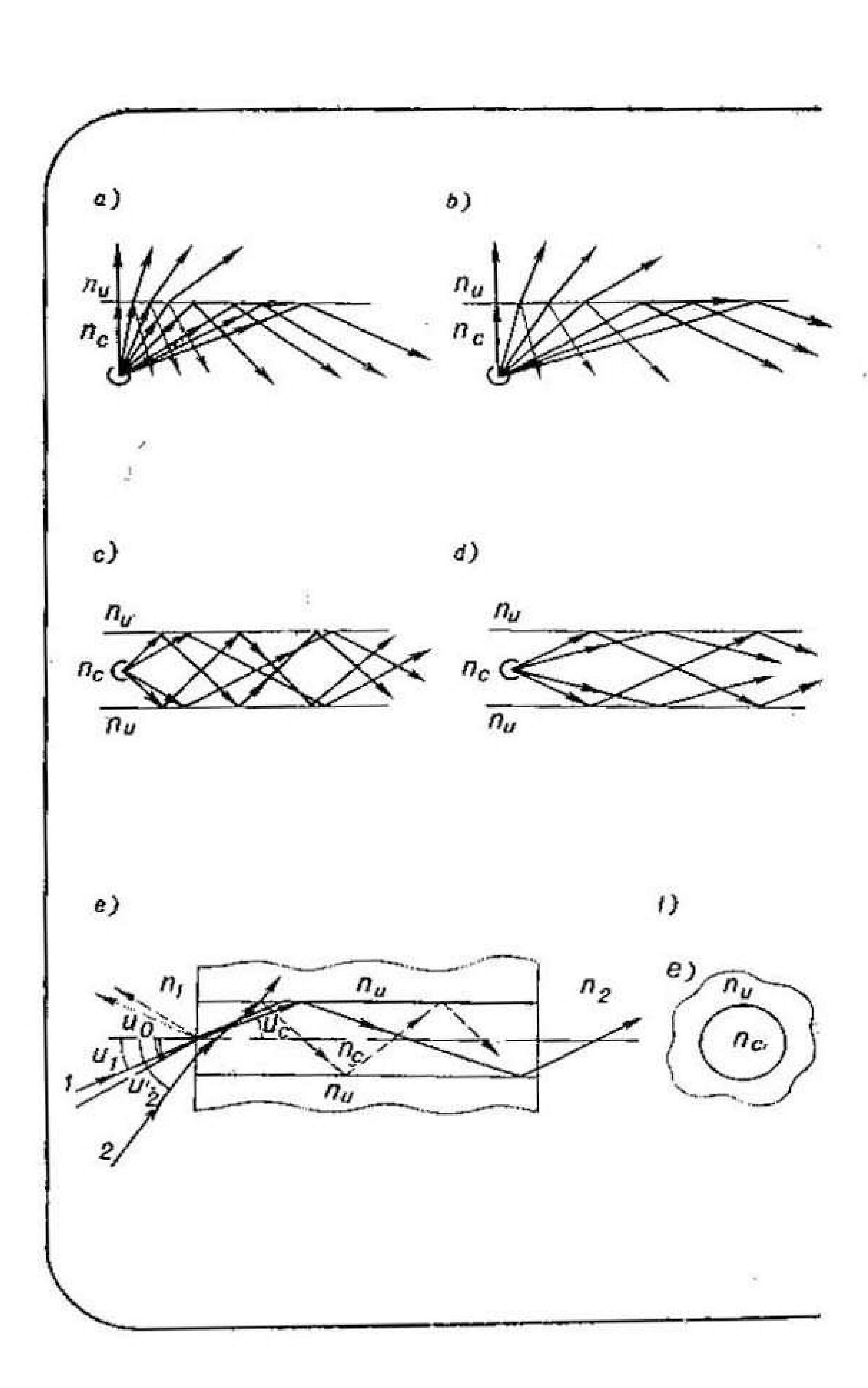
luz desde el aire (índice de refracción $n_u = 1$) al vidrio (índice de refracción $n_c = 1{,}53$), es decir, de un medio ópticamente menos denso, a otro ópticamente más denso. En este caso la parte de luz reflejada crece a medida que aumenta el ángulo de incidencia, sin embargo, incluso para ángulos de incidencia muy grandes, cercanos a 90°, cuando el rayo casi desliza a través de la superficie de separación, hay todavía una parte de luz que se refracta y pasa al segundo medio.

El proceso de repartición de la luz en las partes reflejada y refractada cualitativamente varía durante la incidencia de los rayos desde un medio ópticamente más denso, en la frontera de separación de éste con otro medio ópticamente menos denso, es decir, que tiene un índice de refracción menor. En este caso, la luz reflejada también aumenta al crecer el ángulo de incidencia (fig. 7, *b*), pero este aumento obedece a otra ley: a partir de cierto ángulo de incidencia j_k, toda la energía luminosa se refleja totalmente en la frontera de separación y el coeficiente de reflexión es igual a 1. Este fenómeno se llama reflexión total interna, y el ángulo de incidencia j_k recibe el nombre de ángulo crítico de reflexión total interna y se determina por la expresión:

$$\text{sen } j_k = \frac{n_u}{n_c}, \qquad (1)$$

donde n_u y n_c son los índices de refracción de los medios ópticamente menos denso y ópticamente más denso, respectivamente, con la particularidad de que $n_c > n_u$.

En la fig. 8 se muestra el caso de incidencia de un haz de rayos desde un medio ópticamente más denso en la frontera de separación con otro medio ópticamente menos denso. Como se puede



a)
b)
c)
d)
e)
f)
e)

apreciar en la fig. 8, *a*, *b* al disminuir la diferencia entre los índices de refracción de los medios, el ángulo crítico j_k de reflexión interna total aumenta, es decir, disminuye la parte de la energía luminosa que regresa totalmente al primer medio.

Si delante de dicha frontera de separación y paralela a ésta se coloca una segunda frontera con la misma diferencia de los índices de refracción (fig. 8, *c*, *d*), entonces los rayos que experimentaron una reflexión interna en la segunda frontera, regresan a la primera, de ésta a la segunda y así sucesivamente, es decir, los rayos luminosos caerían como en una trampa entre las dos fronteras de separación. Como se aprecia en la fig. 8, *c*, *d*, *e*, al disminuir la diferencia entre los índices de refracción de los medios disminuye la parte del flujo del haz de rayos dado que se propaga gracias a las múltiples reflexiones totales internas dentro del medio ópticamente más denso.

Un elemento así, con dos superficies paralelas de separación del medio ópticamente más denso (en este caso conducto de luz) con otros medios ópticamente menos densos es en esencia el prototipo de la guía de luz. Esta última tiene por lo general un filamento con eje de simetría, por ejemplo, de sección circular, de un material con alto índice de refracción n_c (fig. 8, *e*, *f*) rodeada por una envoltura cerrada que posee un índice de refracción n_u menor; generalmente n_u es mayor que 1 y su valor está en el intervalo 1,45 — 1,52. A pesar de que al disminuir la diferencia entre n_c y n_u, la parte del flujo que se propaga

⟵

FIG. 8. Incidencia de un haz de rayos de un medio ópticamente más denso $n_c = 1{,}53$ en la frontera de separación con otro medio ópticamente menos denso n_u : *a*, *c* — $n_u = 1{,}0$; *b*, *d* — n_u — 1,33; *e*, *f* — secciones longitudinal y transversal de una guía de luz

a través de la guía de luz disminuye, en la práctica todos los filamentos conductores de luz llevan una envoltura, la cual protege a la superficie reflectora de los efectos mecánicos y de las impurezas y sirve de aislamiento luminoso entre los filamentos elementales conductores de luz al empaquetarlos en un haz compacto. Además, desempeña el papel de medio de ligazón de las piezas fibrosas termoprensadas.

Luminosidad de la guía de luz recta de sección constante. En la fig. 8, *e* está representada una guía de luz recta de sección constante con caras rectangulares. El rayo *1* que incide sobre la cara de entrada de la guía de luz bajo un ángulo u_1, se refracta y tiene dentro del filamento un ángulo de inclinación u_c respecto al eje de la guía de luz. El rayo incide sobre la superficie lateral de la guía de luz bajo un ángulo j. Si el ángulo j es igual o mayor que el ángulo crítico j_k de reflexión interna total, el rayo 1, al experimentar una reflexión interna total, incide en el otro sector de la superficie lateral del filamento bajo el mismo ángulo, sufre una segunda reflexión total interna y así sucesivamente; en esta forma se propaga dentro del filamento y sale de éste solamente por la cara opuesta.

El rayo *2*, que incide formando un ángulo u_2, después de refractarse en la cara de entrada alcanza la superficie lateral de la guía de luz bajo un ángulo $j < j_k$, por esta razón sale a la envoltura y no se propaga por el filamento. Los rayos de este tipo se denominan *fuera de abertura*.

Los ángulos u_1 y u_c, en presencia a la entrada de un medio con índices de refracción n_1 y n_c, están relacionados entre sí por la igualdad n_1 sen $u_1 = n_c$ sen u_c. Teniendo en cuenta que el ángulo $j = 90° - u_c$ y con ayuda de la fig. 8, se puede demostrar que el ángulo máximo u_{1a}

bajo el cual todos los rayos todavía se propagan por la guía de luz gracias a las múltiples reflexiones totales internas, se determina según la fórmula:

$$A_1 = n_1 \operatorname{sen} u_{10} = \sqrt{n_c^2 - n_u^2}. \qquad (2)$$

La magnitud $A_1 = n_1$ sen u_{10} se denomina abertura numérica de la guía de luz. Si a la entrada del filamento hay aire ($n_1 = 1$), la abertura numérica de la guía de luz será:

$$A_0 = \operatorname{sen} u_0 = \sqrt{n_c^2 - n_u^2}. \qquad (3)$$

La magnitud $A_0 = \operatorname{sen} u_0 = \sqrt{n_c^2 - n_u^2}$ se llama abertura numérica *nominal* de la guía de luz.

Como se puede apreciar de la fig. 8, *e* cierta parte de la energía de los rayos fuera de abertura *2* se refleja dentro del filamento también para ángulos $u_1 > u_0$, es decir, para $j < j_k$. Sin embargo, es evidente que después de varias reflexiones y las subsiguientes refracciones esta parte de la energía dentro del filamento disminuye rápidamente hasta cero.

El ángulo de abertura nominal u_0 determina la abertura máxima (ángulo en el vértice) del haz cónico de rayos, que pueden propagarse por una guía de luz recta. Si el haz cónico de rayos, que incide sobre la cara de entrada del filamento, tiene en el vértice un ángulo de abertura $u_1 < u_0$, puede pasar totalmente a través del filamento, es decir, su transmisibilidad τ_1 (sin considerar las pérdidas en la reflexión en las caras y dentro de la fibra en la absorción y dispersión) es igual a 1.

Si por el contrario, $u_1 > u_0$, la transmisibilidad τ_1 del haz cónico de los rayos por la guía de luz se determina por la expresión:

$$\tau_1 = \frac{\operatorname{sen}^2 u_0}{\operatorname{sen}^2 u_1}. \qquad (4)$$

Puesto que $u_1 > u_0$, entonces $\tau_1 < 1$. Cuanto mayor sea la diferencia $u_1 - u_0$ tanto mayor será el número de rayos fuera de abertura y tanto menor τ_1. Por ejemplo, si sobre la cara de entrada del filamento inciden rayos en todas las direcciones de una semiesfera (radiación difusa), es decir, $u_1 = 90°$, entonces $\tau_1 = \operatorname{sen}^2 u_0 = n_c^2 - n_u^2$. Si los índices de refracción del filamento y de la envoltura se escogen de tal manera que $A_0 = \sqrt{n_c^2 - n_u^2} = 1$, entonces la transmisibilidad en el aire por la guía de luz del haz cónico de rayos con cualquier abertura u_1 será siempre igual a 1. El coeficiente τ_1 se suele llamar la transmisibilidad *geométrica* de la guía de luz. Este determina el coeficiente de transmisibilidad del flujo *útil* (de información) a través de un filamento dado conductor de luz.

De esta manera, la abertura numérica nominal A_0 constituye una de las características fundamentales de la guía de luz y determina su poder de convergencia luminosa (luminoconvergencia) y de transferencia luminosa, es decir, su *luminosidad*. Como se ve en la fórmula (4), la luminosidad de la guía de luz es igual a A_0^2, es decir, igual a $n_c^2 - n_u^2$.

La abertura numérica nominal A_0 de las guías de luz no solamente determina la luminosidad y transmisibilidad geométrica de éstos, sino también las modificaciones de la radiación, que se propaga a través de una pieza fibrosa, la calidad de la información transformada, el radio de curvatura de las guías de luz, el ángulo de inclinación de sus caras y el ángulo de conicidad, admisibles en los focones, la efectividad de acción del efecto de borde, la magnitud del flujo estimulado en una guía de luz activa (láser de fibra), la cantidad y los tipos de ondas que pueden propagarse a través de guías de luz transparentes y otros parámetros ópticos de los

elementos de fibras. En síntesis, la abertura numérica nominal de las guías de luz determina el empleo de una pieza fibrosa en un sistema óptico o electronoóptico concreto.

Nomograma para la determinación de $A_0 = \sqrt{n_c^2 - n_u^2}$. Desde el punto de vista de la luminosidad y la calidad de la información transmitida, las guías de luz con abertura luminosa igual o mayor de la unidad son dispositivos óptimos. Sin embargo, la gran mayoría de pares de vidrios utilizados en la práctica y tecnológicamente satisfactorios garantizan una abertura numérica menor que la unidad.

En la elaboración de los elementos fibrosos en la práctica, la elección de los pares de vidrios según sus índices de refracción se realiza, bien sea por el vidrio dado del filamento, o bien por el vidrio dado de la envoltura. En algunos casos, al elaborar un par de vidrios, cuyas piezas fibrosas deben corresponder a un determinado complejo de requisitos fisicoquímicos y termomecánicos, hay que aceptar los índices de refracción que se obtienen para los vidrios que, generalmente, dan una abertura numérica cerca de 0,5—0,8, lo cual no siempre garantiza las características ópticas requeridas.

Al escoger un par de vidrios y en el empleo de las guías de luz de éstos, surge siempre la necesidad de conocer la abertura numérica nominal y su dependencia de la longitud de onda de la radiación a partir de los conocidos índices de refracción de los materiales del filamento y de la envoltura. Para la determinación rápida de A_0 o simplemente de la abertura nominal $u_0 = \arcsin A_0$ de las guías de luz transparentes según los índices de refracción conocidos n_c y n_u conviene utilizar el nomograma (fig. 9). Para determinar A_0; u_0 ó n_c; n_u hay que unir por medio de una línea recta los valores de n_c y n_u;

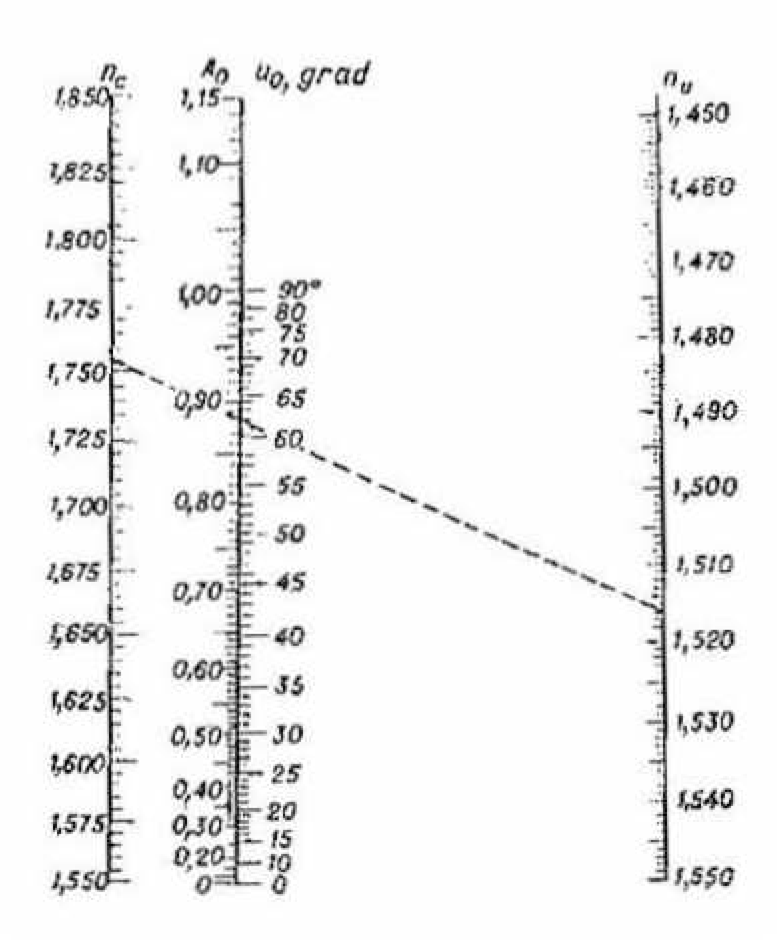


FIG. 9. Nomograma para determinar $A_0 = \sqrt{n_c^2 + n_u^2}$

el punto de intersección de la recta con la escala intermedia, indica los valores de A_0 y u_0.

El nomograma ha sido trazado para un intervalo de los índices de refracción de los vidrios ópticos transparentes en la gama visible del espectro. Por un principio análogo es fácil trazar nomogramas para cualquier intervalo de los índices de refracción. Para la utilización en el laboratorio de un nomograma dado resulta más cómodo trazarlo para un intervalo de los índices de refracción desde 1,4 (para el filamento rodeado de aire) hasta 4 (vidrios infrarrojos). Esto permite cubrir prácticamente todo el intervalo de los índices de refracción de los materiales ópticos, utilizados hoy día para la fabricación de elementos fibrosos.

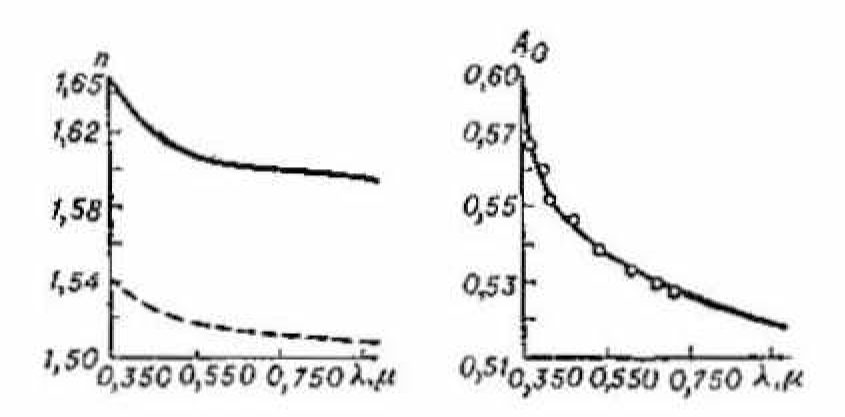


FIG. 10. Dependencia de los índices de refracción n de los vidrios БФ25 (———) y K 17 (— — —) (BF 25 y K 17) y de la abertura numérica A_0 de las guías de luz de un par de vidrios БФ 25-K17 (BF25—K17) de la longitud de onda de la radiación

Dependencia de A_0 de la longitud de onda de la radiación. El índice de refracción de los vidrios ópticos depende de la longitud de onda de la radiación; por regla general, al aumentar la longitud de onda de la radiación, el índice de refracción de los vidrios disminuye. En la fig. 10 se muestra la dependencia de la longitud de onda de los índices de refracción de los vidrios БФ25 y K17 (BF25 y K17), que son los más difundidos en la fabricación de diferentes elementos fibrosos flexibles.

La abertura numérica de las guías de luz depende también de la longitud de onda de la radiación transmitida. Para la mayoría de pares de vidrios ópticos, la abertura numérica de las guías de luz disminuye al aumentar la longitud de onda. En la fig. 10 se muestra la dependencia de la abertura numérica de la longitud de onda para las guías de luz de vidrio БФ25 y K17 (BF25 y K17)

Efecto de borde en una guía de luz recto. El ángulo u_0 que se determina según la expresión (3), es el ángulo máximo para el cual *todos los rayos* que inciden en *cualquier* punto de la cara

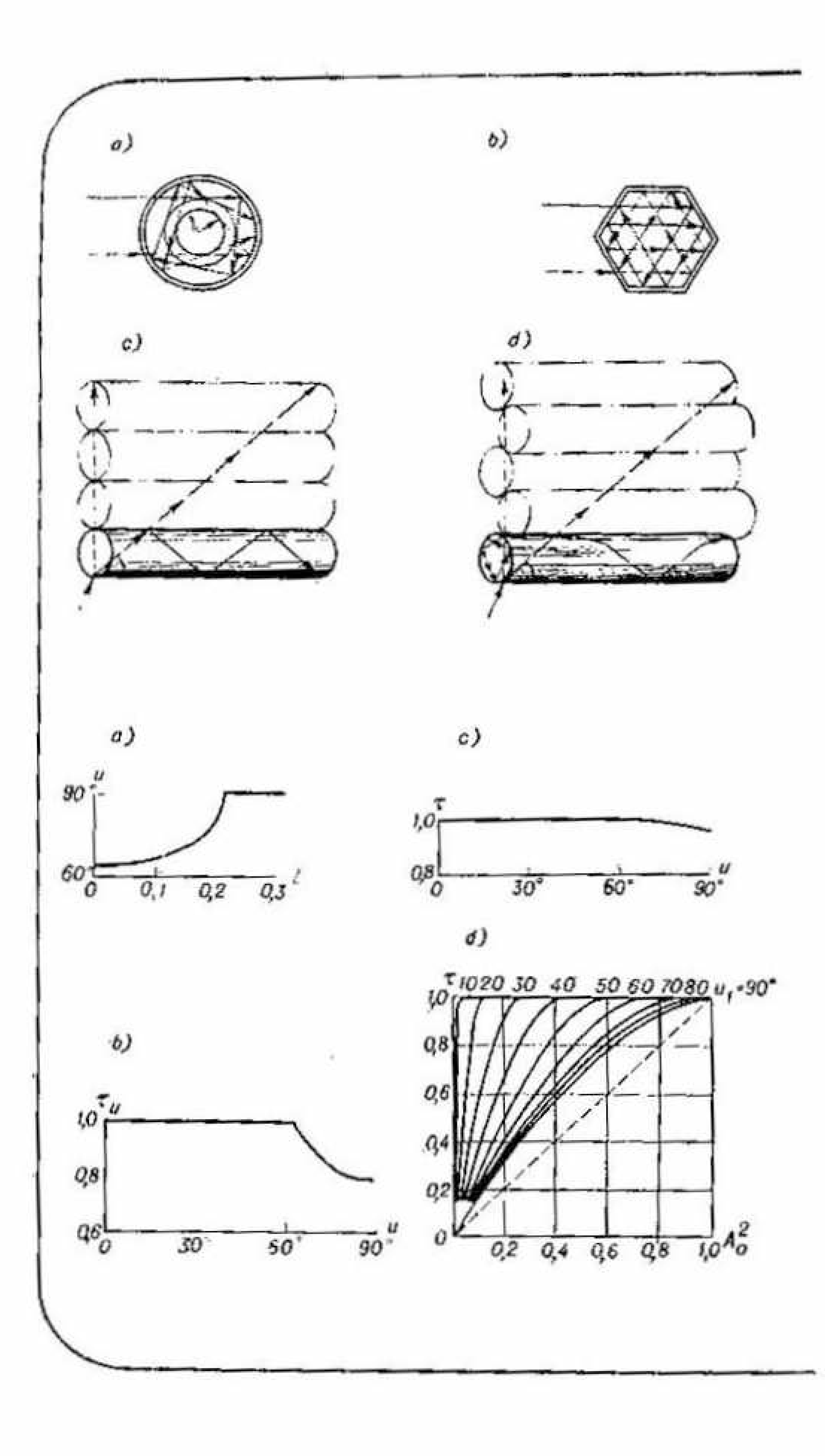

a)
b)
c)
d)
a)
c)
b)
d)
90°
60°
0
0,1
0,2
0,3
1,0
0,8
0
30°
60°
90°
u
1,0
0,8
0,6
0
30°
50°
90°
10 20 30 40 50 60 70 80 $u_1 = 90°$
0,2
0,4
0,6
0,8
1,0
A_o^2

FIG. 11. Trayecto de los rayos en una guía de luz
←—

de entrada de la guía de luz, se propagan en éste, gracias a la reflexión total interna en la frontera filamento—envoltura. Estrictamente hablando (véase la fig. 8, *e*), este ángulo viene a ser la abertura nominal de los rayos meridionales, es decir, de los rayos que cortan al eje de la guía de luz. Para un mismo ángulo de inclinación u_1, los rayos desviados en la entrada de la guía de luz, es decir, los que no cortan el eje de éste, inciden sobre la superficie lateral de la guía de luz formando un ángulo mayor, que los meridionales. Esto conduce a que para ángulos $u_1 > u_0$, cuando los rayos meridionales ya no se propagan en la guía de luz, una parte de los rayos desviados precisamente los que inciden en el borde (anillo periférico) de la cara de entrada de la guía de luz— encuentran la superficie lateral bajo el ángulo de reflexión total interna y se propagan por la guía de luz. De aquí el nombre de efecto de borde.

A diferencia de los rayos meridionales, los rayos abiertos (desviados) se propagan dentro de la guía de luz siguiendo una línea helicoidal quebrada, y de todo el conjunto de los rayos que inciden en la cara de entrada de la guía de luz, una mitad describe en el proceso de su propagación una línea helicoidal quebrada con giro a la izquierda, mientras que la otra, con giro a la derecha. En la fig. 11, *a*, *b* se muestra la proyección de los rayos inclinados sobre la sección transversal de la guía de luz. Como se ve de la fig. 11, *a*, en la guía de luz recta de sección circular, el diámetro *l* del cilindro tangente al rayo dado, durante la propagación de este rayo a través de la guía de luz permanece

←—

FIG. 12. Efecto de borde en las guías de luz

constante. En una guía de luz poliédrica no se observa este fenómeno (fig. 11, *b*).

El ángulo de incidencia u_1 de los rayos en la cara de entrada de la guía de luz, para el cual éstos alcanzan la frontera filamento—envoltura bajo el ángulo de reflexión total interna, se determina por la expresión:

$$\operatorname{sen} u_1 = \frac{A_0}{\sqrt{1 - \frac{l^2}{D_c^2}}}, \qquad (5)$$

donde D_c es el diámetro del filamento.

Como se aprecia en la fig. 12, *a*, el efecto de borde conduce a que al crecer l aumente el ángulo de inclinación u_1 de los rayos en el aire, para el cual los rayos oblicuos alcanzan la frontera filamento—envoltura bajo el ángulo de reflexión total interna. El efecto de borde aumenta el coeficiente efectivo (real) τ_1 de la transmisibilidad geométrica de las guías de luz; esto se puede apreciar en la fig. 12, *b*, que muestra la dependencia de la transmisión de una guía de luz idealmente transparente, del ángulo de incidencia de un haz de rayos paralelos sobre la cara de la guía de luz. Cuando $u_1 > u_0$, la transmisión de luz de la guía de luz es diferente de cero. Esta influencia del efecto de borde se manifiesta más intensamente cuando sobre la cara de la guía de luz incide haz de rayos cónico (fig. 12, *c*). La fig. 12, *d* representa la dependencia del coeficiente de transmisibilidad τ_1 del cono de rayos por una guía de luz idealmente transparente de la luminosidad nominal A_0^2, teniendo en cuenta los rayos oblicuos; la transmisión de la luz difusa ($u_1 = 90°$) calculada solamente en función de los rayos meridionales, se indica por medio de la línea punteada.

De esta manera, las partes periféricas de la sección de la guía de luz dejan pasar los haces

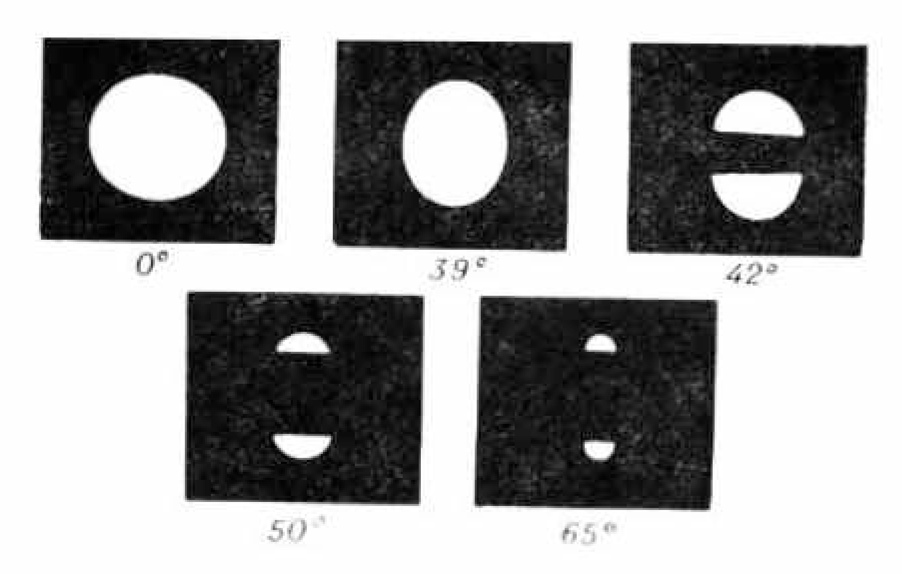


FIG. 13. Fotografía de la cara de salida de una guía de luz ($A_0 = 0{,}613$) bajo diferentes ángulos u respecto a su eje

de rayos de gran abertura y, por lo tanto, poseen una gran transmisión geométrica del haz de rayos cónico, por ejemplo, del difuso (del cono de difusión). El efecto de borde que se debe a este fenómeno, se puede observar en la cara de salida de la guía de luz para ángulos de abertura $u_1 > u_0$ (fig. 13). El efecto de borde tiene lugar en las guías de luz de cualquier construcción.

Luminosidad de las guías de luz de construcción compleja. Además de la guía de luz simple que hemos analizado, en la construcción de instrumentos son ampliamente utilizadas guías de luz de construcción compleja (en forma monofilar y de un haz) como son, por ejemplo: rectas y de sección constante con caras inclinadas, de sección variable a lo largo de su longitud, curvas y otras (fig. 14).

Las fórmulas (2) y (3) son las fundamentales y aparecen en las expresiones que determinan la abertura numérica de las guías de luz de cualquier construcción. Todas las construcciones de las guías de luz, siendo iguales los valores de

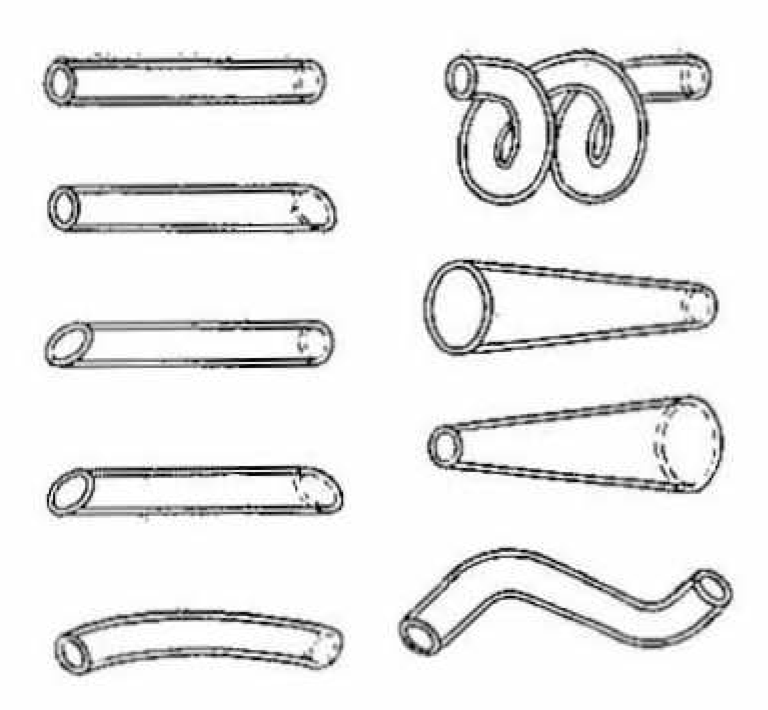


FIG. 14. Construcciones más difundidas de las guías de luz monofilares

n_c y n_u, tienen una abertura numérica A_1 menor que la de una guía de luz recta de sección constante y con caras rectas. La única excepción la constituye la guía de luz de sección creciente y caras rectas, puesto que en este caso, con otras condiciones iguales, los rayos con una inclinación dada a la entrada alcanzan la superficie lateral de una guía de luz que se ensancha bajo un ángulo mayor que en una guía de luz recta de sección constante.

Si en una guía de luz recta de sección constante y caras rectas, con la condición de *igualdad* de sus índices de refracción en la entrada y salida, la abertura numérica se determina únicamente por el ángulo crítico j_k de reflexión total interna (este es la limitación fundamental de la luminosidad de las guías de luz), la abertura numérica de las guías de luz de construcción compleja depende también de otras condiciones complementarias. Veamos las limitaciones funda-

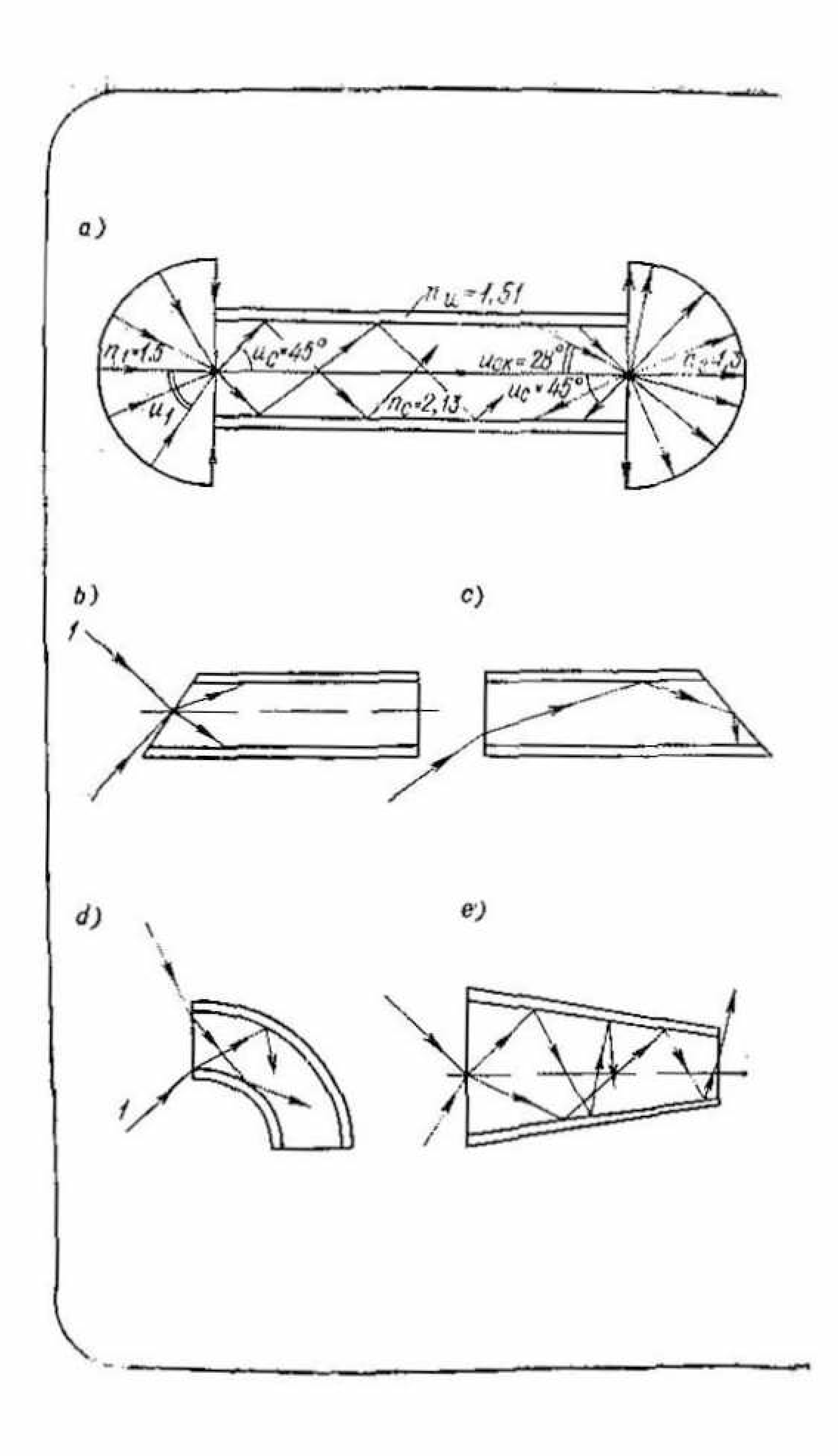
mentales de la luminosidad de las guías de luz de construcciones típicas.

Limitación de la luminosidad de una guía de luz de sección constante y caras rectas. En la construcción de aparatos, los elementos fibrosos frecuentemente se utilizan en condiciones, cuando una o las dos caras de la guía de luz se encuentran en contacto óptico con un medio que tiene un índice de refracción mayor de 1. Por ejemplo, en los aparatos electrono-ópticos, las piezas de fibras pueden tener en la cara de entrada un luminóforo, y en la cara de salida, un fotocátodo, una película fotográfica y otros dispositivos. Ya en una guía de luz recta de sección constante y con caras rectas, la desigualdad de los índices de refracción de los medios en la entrada y salida puede conducir a una restricción de la luminosidad de la guía de luz en total. Matemáticamente, esta limitación se expresa en forma de la igualdad:

$$n_1 \operatorname{sen} u_1 = n_c \operatorname{sen} u_c = \sqrt{n_c^2 - n_u^2} = n_2 \operatorname{sen} u_2, \quad (6)$$

donde n_1 y n_2 son los índices de refracción del medio en la entrada y salida respectivamente; u_1 y u_2, los ángulos de abertura de los rayos en la entrada y salida.

Analicemos una guía de luz con un índice de refracción del filamento $n_c = 2{,}13$ y de la envoltura $n_u = 1{,}51$. Dicha guía de luz tiene una abertura numérica nominal en el aire $A_0 = \sqrt{n_c^2 - n_u^2} = 1{,}5$. Supongamos que en la entrada de la guía de luz se encuentra un medio con índice de refracción $n_1 = 1{,}5$ (fig. 15, *a*). En este caso, como se aprecia en la igualdad (6), $n_1 \operatorname{sen} u_1 = 1{,}5$, es decir, esta guía de luz en el primer medio tiene una abertura numérica $\operatorname{sen} u_1 = \frac{1}{n_1}\sqrt{n_c^2 - n_u^2} = 1$. En otras palabras,


a)
$n_u=1{,}51$
$n_1=1{,}5$
$u_c=45°$
$u_{ck}=28°$
$n_c=2{,}13$
$u_c=45°$
u_1
b)
c)
d)
e)
1
1
1

a través de la guía de luz se propagarán todos los rayos que inciden en su cara de entrada bajo cualquier ángulo (radiación difusa). Si a la salida de esta guía de luz, el medio tiene un índice de refracción $n_2 \gg 1,5$, todos los rayos que alcanzan la cara de salida de la guía, salen de éste. Si en cambio $n_2 < n_1$, una parte de los rayos experimenta una reflexión interna total en la cara de salida y regresa a través de la guía de luz al primer medio. En el ejemplo anterior supongamos que el medio en la salida tiene $n_2 = 1,3$. Los rayos que inciden del medio n_1 con una pendiente de 90°, van a tener en el filamento un ángulo de inclinación u_c respecto al eje, determinado a partir de la igualdad (6): $u_c = 45°$.

Además de la condición de la reflexión total interna para la cara de salida n_c sen $u_{ch} = n_2$ encontramos que en el medio $n_2 = 1,3$ salen de la guía de luz solamente aquellos rayos que tienen un ángulo de inclinación respecto al eje de la guía de luz no mayor que $u_{ch} = \text{arc sen} \frac{n_2}{n_c} = 28°$, es decir, todos los rayos que llegan hasta la cara de salida, pero que tienen un ángulo de inclinación desde 28° hasta 45°, no saldrán de esta guía de luz y regresan. En el medio n_2, todas las direcciones son copadas por los rayos, es decir, la cara de salida irradiará difusamente. La abertura de entrada efectiva en el medio n_1 de la guía de luz será igual a sen $u_1 = \frac{n_2}{n_1} < 1$ (en el caso analizado $u_1 = 60°$).

La restricción de la luminosidad que hemos analizado actúa para cualquier construcción de las guías de luz, y durante la utilización práctica

←—

FIG. 15. Limitaciones principales de la luminosidad de guías de luz

de los elementos fibrosos en condiciones semejantes es necesario tenerla en cuenta.

Limitación de la luminosidad en una guía de luz recta con cara de entrada inclinada. Al incidir los rayos en la cara de entrada inclinada de una guía de luz (fig. 15, *b*), de todo el conjunto de rayos el *1* llega a la superficie lateral de la guía de luz después de su refracción en la cara de entrada bajo el ángulo mínimo; este rayo determina la abertura numérica de entrada de la guía de luz. La cara de entrada inclinada limita la abertura, la cual es menor que en el caso de cara recta.

Limitación de la luminosidad de una guía de luz recta con cara de salida inclinada. No todos los rayos que llegan hasta la cara de salida inclinada de la guía de luz pueden salir de éste, puesto que una parte de los rayos (fig. 15, *c*) experimenta una reflexión total interna en la cara de salida. Hasta cierto ángulo de inclinación de la cara de salida, todos los rayos que se propagan por la guía de luz salen de éste. Al aumentar el ángulo de inclinación, una parte de los rayos experimenta reflexión total interna, y cuando se alcanza el ángulo de inclinación crítico, todos los rayos experimentan reflexión interna total y ninguno de ellos sale a través de la cara de salida.

Limitación de la luminosidad en una guía de lue curva. Como se puede apreciar en la fig. 15, *d*, de todo el conjunto de los rayos que inciden en la cara de entrada de una guía de luz curva, el rayo 1 que llega al bordo de la cara, alcanza la superficie lateral de la guía de luz formando el ángulo mínimo. Este rayo determina la abertura numérica de una guía de luz curva y la limita.

Limitación de la luminosidad en guías de luz con una sección que se va estrechando. En las

guías de luz con una sección que disminuye en el proceso de propagación (fig. 15, *e*), los rayos aumentan el ángulo de inclinación respecto al eje de las guías. En semejante guía de luz, es necesario que el ángulo de la última reflexión en la superficie lateral de la guía sea igual o mayor que el ángulo crítico de reflexión total interna. Esto limita la abertura de entrada de la guía de luz y, en este caso, los rayos experimentan las primeras reflexiones para ángulos considerablemente mayores que el ángulo crítico de reflexión total interna.

En dependencia de la construcción del elemento de fibra y de las condiciones de su utilización, en un instrumento actúan dos o varias restricciones analizadas de la luminosidad de las guías de luz. En este caso, encuentran la restricción más fuerte (la dominante) y según ésta determinan la luminosidad efectiva de las guías de luz.

Transmisión de luz en guías de luz unitarias. La fórmula (4) indica que la transmisión de luz en una guía de luz depende de su abertura numérica nominal y $\tau_1 < 1$ para $u_1 > u_0$. Esta limitación de la abertura de la transmisión de luz τ_1 se compensa parcialmente por medio del efecto de borde (fig. 12). Además de la restricción de la abertura, en la propagación de la luz por guías de luz pueden haber pérdidas cuyas fuentes son: reflexión de la luz en ambas caras, absorción y dispersión en el material de la guía de luz, dispersión en las microhetereogeneidades (microirregularidades) de la superficie reflectora filamento—envoltura y las reflexiones internas no completamente totales.

Reflexión de la luz en las caras. Al incidir la luz en la frontera de dos medios, una parte de la energía se refleja en el primer medio (fig. 7, *a*). Respecto a la guía de luz, esto conduce

al regreso de cierta parte de la radiación debido a la reflexión en las caras de entrada y salida. Estas pérdidas, lo mismo que las restricciones de las aberturas, es decir, τ_1, no dependen de la longitud de la guía de luz y se determinan por los índices de refracción del filamento y por la abertura del haz cónico de rayos incidentes. En la tabla 1 aparecen los coeficientes de reflexión ρ, al incidir un haz cónico de rayos de abertura u_1 en la superficie de un medio de un índice de refracción n_c. La transmisión de luz de la cara de entrada de la guía de luz, considerando solamente la reflexión, es igual a $1 - \rho$, mientras que si se tiene en cuenta la reflexión en ambas caras, la transmisión de luz τ_2 de la guía de luz se determina según la expresión:

$$\tau_2 = (1 - \rho)^2. \qquad (7)$$

Como se aprecia en la tabla 1, donde se encuentran los valores de τ_2, la transmisión de luz, considerando solamente las pérdidas por la reflexión en ambas caras de la guía de luz, aumenta al disminuir el índice de refracción del filamento y de la abertura del haz de rayos cónico. Teniendo en cuenta lo que se ha dicho, los diseñadores de los materiales y de la tecnología de la fibroóptica se esfuerzan por rebajar lo máximo posible los índices de refracción de los vidrios del filamento y de la envoltura, dejando entre ellos una diferencia que garantice la abertura que se necesita.

Aplicando en la superficie de las caras una capa de baja refracción —método ampliamente utilizado en la óptica clásica—, se puede aumentar algo la transmisión de luz de una guía de luz en comparación con los datos de la tabla 1.

Atenuación de la luz por el material de la guía de luz. Una radiación al propagarse por la guía de luz se atenúa debido a la absorción

Tabla 1

Coeficientes de reflexión y de transmisión de luz

U_1 en grados	n_c							
	1,4		1,6		1,8		2,0	
	ρ	τ_2	ρ	τ_2	ρ	τ_2	ρ	τ_2
0	0,028	0,945	0,053	0,897	0,082	0,843	0,111	0,790
10	0,028	0,945	0,053	0,897	0,082	0,843	0,111	0,790
20	0,028	0,945	0,053	0,897	0,082	0,843	0,111	0,790
30	0,028	0,945	0,054	0,895	0,082	0,843	0,112	0,789
40	0,029	0,943	0,055	0,893	0,084	0,839	0,113	0,787
50	0,031	0,939	0,058	0,887	0,087	0,834	0,116	0,782
60	0,037	0,927	0,064	0,876	0,093	0,823	0,122	0,771
70	0,047	0,908	0,075	0,856	0,104	0,803	0,132	0,753
80	0,063	0,878	0,092	0,825	0,121	0,773	0,148	0,726
90	0,077	0,852	0,106	0,799	0,134	0,750	0,161	0,704

y dispersión en el material de la fibra. La transmisión de luz del haz cónico de rayos de abertura u_1 es casi igual a la transmisión de luz del haz dirigido de los rayos que inciden en la cara de entrada de la guía de luz bajo un ángulo u_1. Por esta razón, el coeficiente de transmisión de luz τ_3 de la guía de luz, teniendo en cuenta solamente la atenuación debida al material, en la práctica se puede calcular con suficiente precisión utilizando la fórmula:

$$\tau_3 = 10^{-\varepsilon P},$$

donde ε es el índice de atenuación (absorción y dispersión) de la luz por el material de la guía de luz;

P es la longitud del recorrido del rayo múltiplemente reflejado en el filamento.

El recorrido de los rayos en una guía de luz recta está representado en la fig. 11, *c*, *d* y se forma por la reflexión especular sucesiva y múltiple. Como se aprecia en la gráfica de la fig. 11,

en una guía de luz recta de sección constante, la longitud P total del recorrido del rayo —meridional u oblicuo— se determina por la expresión:

$$P = L \sec u_c = \frac{L}{\sqrt{1 - \frac{\operatorname{sen}^2 u_1}{n_c^2}}}, \tag{9}$$

donde L es la longitud de la guía de luz y no depende del diámetro del filamento.

Tomando en cuenta la expresión (9), la fórmula (8) se transforma en:

$$\tau_3 = 10^{-\left(\frac{\varepsilon L n_c}{\sqrt{n_c^2 - \operatorname{sen}^2 u_1}}\right)}. \tag{10}$$

En esta última expresión se ve que la transmisión de luz, considerando la atenuación de la luz en el material, depende de la calidad del vidrio de la fibra, de la longitud de la guía de luz, del índice de refracción de la fibra y del ángulo de inclinación del rayo respecto al eje de la guía de luz. La transmisión de luz τ_3 se reduce al aumentar la longitud y el índice de atenuación del material y disminuye insignificantemente al aumentar el ángulo de inclinación u_1. La transparencia de los materiales varía de acuerdo con la longitud de onda de la radiación incidente. Por esta razón, al calcular la transmisión de luz en un amplio intervalo de longitudes de onda, es necesario tener en cuenta la dependencia de ε de la longitud de onda de la radiación.

Pérdidas de luz en las reflexiones internas. El científico ruso A. A. Eijenvald demostró en 1909 que en la reflexión total interna de una onda luminosa la energía del rayo incidente parece «sumergirse» en el segundo medio para luego aparecer por completo en el rayo reflejado

en el primer medio. En una reflexión total interna unitaria en la frontera de separación de medios altamente transparentes, el coeficiente de reflexión unitaria es prácticamente igual a 1. Así, en una serie de investigaciones se demostró que el coeficiente de una reflexión total interna unitaria en dependencia de la transparencia del vidrio de la envoltura y de la calidad de la frontera de separación filamento—envoltura se encuentra en el intervalo 0,99900—0,9999990.

En las guías de luz con envoltura, por ejemplo, de vidrio, la reflexión, hablando estrictamente, tiene lugar en el medio que absorbe la luz. Por esta razón, el coeficiente de reflexión total interna depende del índice de atenuación del material de recubrimiento y desde el punto de vista energético no es total. Debido a las reflexiones internas múltiples del rayo en la guía de luz, las pérdidas en las reflexiones se manifiestan en la transmisión de luz. Para el haz de rayos dirigido la transmisión de luz τ_4, teniendo en cuenta únicamente las pérdidas en las reflexiones internas, es igual a:

$$\tau_4 = \rho_b^{\eta}, \qquad (11)$$

donde ρ_b es el coeficiente de reflexión interna unitaria;

η es el número de reflexiones que experimenta el rayo al propagarse a través de la guía de luz.

Como se aprecia en la fig. 11, *c*, para el rayo meridional, el número de reflexiones en una guía de luz recta de sección constante depende de la longitud L y del diámetro D_c del filamento y del ángulo u_c de inclinación del rayo en el filamento:

$$\eta = \frac{L}{D_c} \operatorname{tg} u_c = \frac{L \operatorname{sen} u_1}{D_c \sqrt{n_c^2 - \operatorname{sen}^2 u_1}}. \qquad (12)$$

Sin embargo, como se ve en la fig. 11, *d*, los rayos inclinados experimentan mayor número de reflexiones que los meridionales. Por lo tanto, el cálculo de la transmisión de luz τ_4 a partir del número de reflexiones de los rayos meridionales no es exacto. El número promedio de reflexiones η_e respecto a la sección en una guía de luz recta y cilíndrica se determina por la expresión:

$$\eta e = 1,18 \frac{L}{D_c} \operatorname{tg} u_c, \qquad (13)$$

es decir, el número promedio de reflexiones respecto a la sección es 1,18 veces mayor que para los rayos meridionales. De la expresión (13) se ve que en un filamento de 10μ de diámetro para un ángulo de inclinación del rayo $u_c = 30°$, un rayo meridonal en una guía de luz de 100 mm de longitud experimenta 5 775 reflexiones; el rayo inclinado, tangente al cilindro de 5μ de diámetro, experimenta 23 100 reflexiones y el número promedio de reflexiones según la sección es igual a 6 800.

Considerando las expresiones (12) y (13), la fórmula (11) toma la forma

$$\tau_4 = \rho_b^{\frac{1,18 L \operatorname{sen} u_l}{D_c \sqrt{n_c^2 - \operatorname{sen}^2 u_l}}}, \qquad (14)$$

es decir, la transmisión de luz, considerando tan sólo las pérdidas por reflexiones internas, depende de la longitud y diámetro del filamento, de su índice de reflexión, del ángulo de inclinación de los rayos respecto al eje de la guía de luz, y, teniendo en cuenta ρ_b, del índice de atenuación del material de la envoltura y de la calidad de la frontera de separación filamento—envoltura. Al aumentar el ángulo de inclinación y la longitud de la guía de luz y al disminuir el diámetro del filamento, la transmisión de luz τ_4 disminuye.

El análisis de las fuentes fundamentales de las pérdidas luminosas indica que éstas se pueden clasificar de dos maneras: Las pérdidas en las caras (dependencia de τ de la abertura numérica y la reflexión de la luz en las caras) y las pérdidas lineales (dependencia de τ de la longitud del filamento). Todas las formas de pérdidas aumentan, al crecer la abertura del haz de rayos incidente.

La luminosidad resultante de una guía de luz unitaria es igual al producto de los coeficientes de transmisibilidad que se definen por las expresiones (4), (7), (10), (14) y toman en consideración por separado las fuentes principales de las pérdidas luminosas.

$$T_1 = \tau_1\tau_2\tau_3\tau_4. \tag{15}$$

Qué es una guía de luz. Todo lo anteriormente expuesto en este capítulo permite en primera aproximación responder a la pregunta: «¿Qué es una guía de luz?» Sin embargo, el concepto de guía de luz a que se refiere la fibroóptica no puede definirse completamente a base de lo antes expuesto si no se toman en cuenta otros aspectos de la propagación de la luz a través de un filamento conductor de luz como, en particular, la simetrización del haz de rayos en la guía de luz y la promediación de la iluminación en la cara de salida del filamento.

Simetrización del haz de rayos en la guía de luz. Durante la incidencia, por ejemplo, de un haz cónico de rayos estrecho sobre una lámina plana paralela o cuneiforme, no se opera ninguna transformación fundamental de la estructura del haz cónico y su directividad se conserva la misma (fig. 16, *a*) o varía (fig. 16, *b*). En el filamento, como resultado de múltiples reflexiones totales internas e independientemente del carácter de las caras, se lleva a cabo la simetrización del haz

de rayos, respecto al eje de la guía de luz. La simetrización conduce, por ejemplo, a que el haz estrecho de rayos que incide bajo un ángulo sobre la cara de salida de la guía de luz de caras rectas, llene al salir el espacio de una zona limitada por dos superficies cercanas cónicas y coaxiales, es decir, una zona cónica anular (fig. 16, *c*).

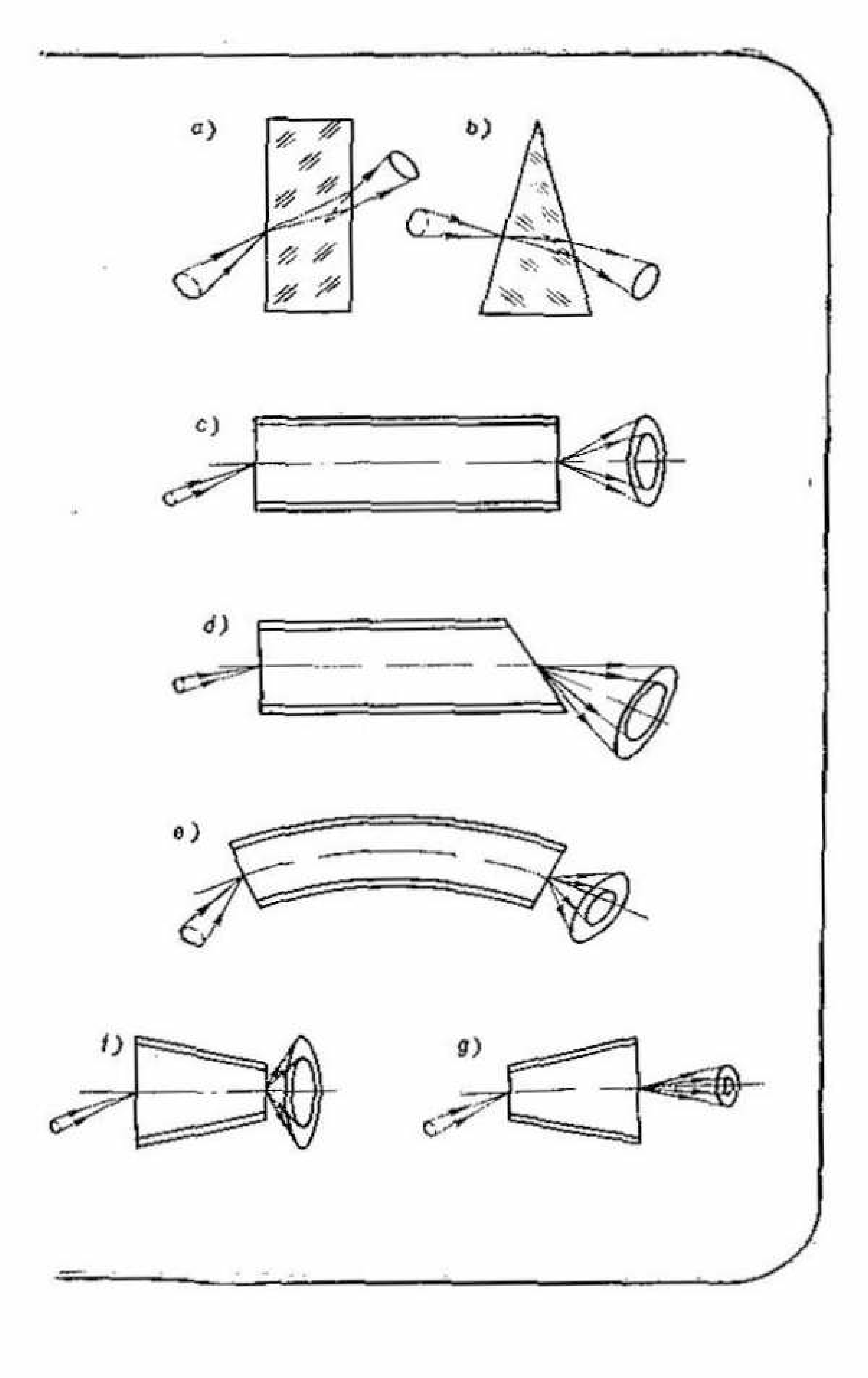
La simetrización del haz de rayos tiene lugar en las guías de luz de cualquier construcción; es decir, en cualquier guía de luz, después de algunas reflexiones de los rayos, aparece una simetría respecto al eje de la distribución luminosa dentro del filamento. Al salir de la guía de luz de construcción compleja, la simetrización del haz de rayos se altera y se observa bien cierta infracción de la simetría de la distribución luminosa en el espacio (fig. 16, *d*, *e*), bien la variación de los ángulos de salida de los rayos conservando la simetría (fig. 16, *f*, *g*).

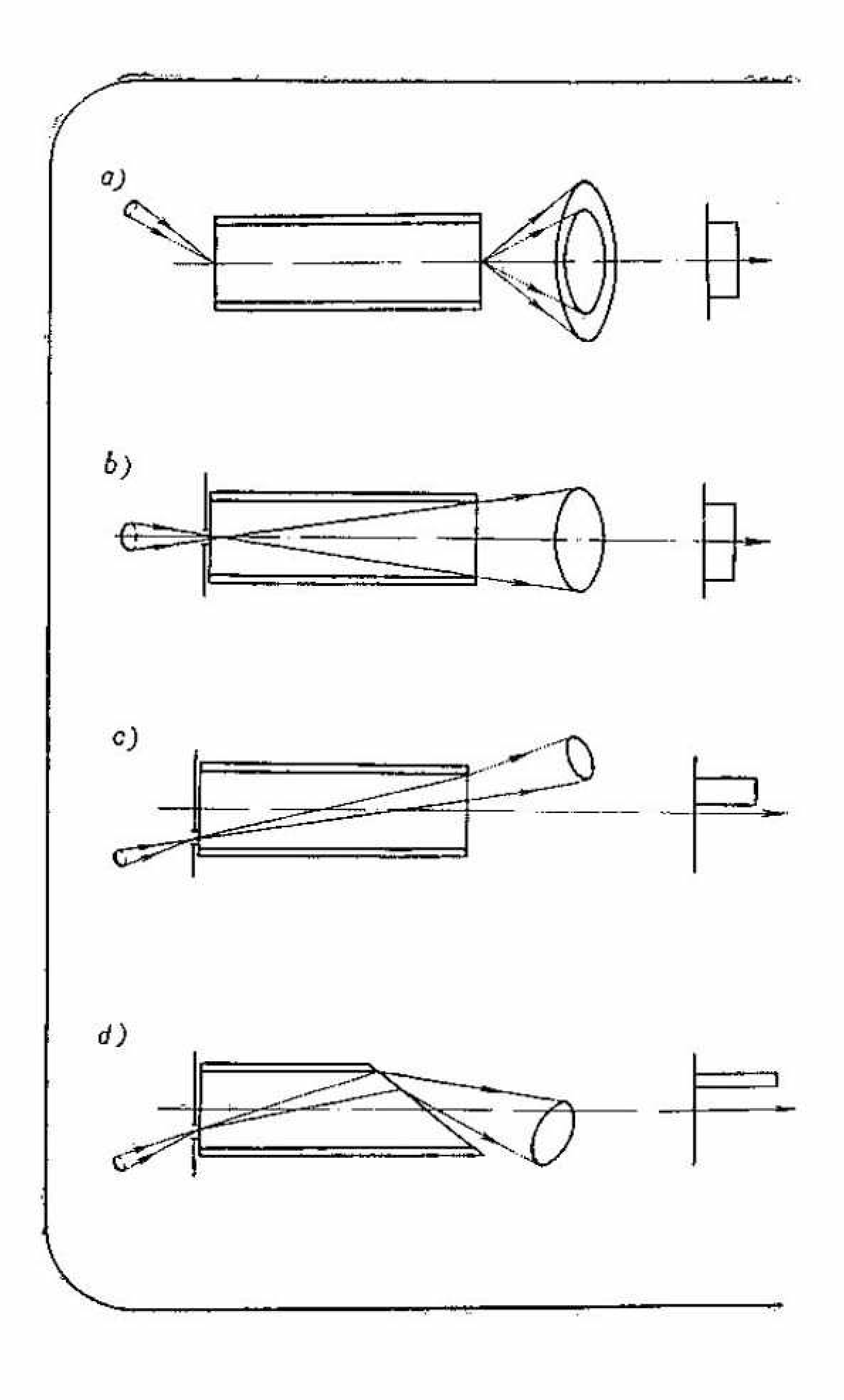
Promediación de la iluminación en la cara de salida del filamento. La simetrización de los rayos dentro del filamento y, como resultado, la mezcla de los rayos, conduce a una distribución promedia de la luz en la cara de salida independientemente de la distribución de la iluminación en la cara de entrada (es decir, independientemente de si toda la cara de entrada está iluminada por los rayos o sólo una parte de ella). Con otras palabras, la iluminación de la cara de salida es igual en todos los puntos.

La simetrización del haz de rayos y la promediación de la iluminación en la cara de salida son las diferencias fundamentales existentes entre las guías de luz y otros elementos ópticos transmisores de luz. Un mismo elemento óptico en forma de filamento con eje de simetría y rodeado

——>

FIG. 16. Simetrización del haz de rayos en las guías de luz


a)
b)
c)
d)
e)
f)
g)


a)
b)
c)
d)

de una envoltura cerrada de baja refracción, en dependencia de las condiciones de incidencia de la luz en su cara de entrada, puede funcionar bien como guía de luz bien como láminas plana paralela o cuneiforme. Por ejemplo, cuando el haz de rayos incide en forma inclinada (fig. 17, *a*), este elemento óptico actúa como una guía de luz; cuando el haz estrecho de rayos incide normalmente (fig. 17, *b*) o cuando la relación entre la longitud y la sección es pequeña, este elemento actúa como una lámina plana paralela (fig. 17, *b*, *c*) o cuneiforme (fig. 17, *d*).

Estas dos particularidades de la propagación de la radiación a través de guías de luz unitarias determinan las reglas de la transferencia de imágenes a través de cualquier elemento fibroso en forma de haz de guías de luz. Realmente, cualquier haz de guías de luz transmite la imagen por elementos (véase el cap. III) y en el caso de ausencia de simetrización del haz de rayos y de promediación de la iluminación en la cara de salida, en el macrodibujo de mosaico fundamental se superpone un microdibujo de mosaico en forma de elementos, dentro de los cuales la iluminación no es constante. Además, a la salida la información sobre el elemento dado de la imagen puede estar contenida no en todas las direcciones exigidas. Todo esto dificulta la percepción y el análisis de la información.

A base de lo expuesto se puede dar la siguiente definición de guía de luz: *la guía de luz* es un elemento óptico, a través del cual los rayos se propagan gracias a las reflexiones totales internas múltiples en la frontera de separación filamento — envoltura y durante el proceso de pro-

←——

FIG. 17. Distribución de luz por la cara de salida de una barra aisladora de luz

pagación experimentan la simetrización respecto al eje del filamento, creando una iluminación uniforme en la superficie de la cara de salida del filamento.

Saturación de una guía de luz. Las guías de luz en la mayoría de los casos tienen una luminosidad que sobrepasa al valor promedio de la luminosidad de los sistemas ópticos clásicos corrientes, por ejemplo, de los sistemas de lentes y espejos. Debido a esto, las guías de luz se caracterizan por una mayor capacidad para transmitir haces amplios de rayos. Esta capacidad representa una de las ventajas esenciales de la transmisión de luz a través de guías de luz frente a los sistemas de lentes y espejos y ofrece la posibilidad, en el presente y en el futuro, de una amplia utilización de elementos fibrosos en la construcción de aparatos.

La efectividad de utilizar en un sistema dado las capacidades de las guías de luz para transmitir amplios haces de rayos se evalúa según la saturación de las guías de luz. Una guía de luz de sección S y de abertura numérica nominal A_0 puede transmitir un flujo Φ_0 de rayos con una luminancia B no mayor de $\Phi_0 = A_0^2 BS$ (sin tener en cuenta el efecto de borde). La saturación nominal H_0 de la guía de luz se determina por la relación entre el flujo luminoso Φ transmitido por la guía en los límites del ángulo de abertura nominal $u_0 = \text{arc sen}\, A_0$ y el flujo $\Phi_0 = A_0^2 BS$

$$H_0 = \frac{\Phi}{A_0^2 BS}. \tag{16}$$

La saturación de una guía de luz recta de sección constante y de caras rectas, en cuya cara de entrada incide un haz cónico de rayos con una abertura $u_1 < u_0$, es

$$H_0 = \frac{\text{sen}^2\, u_1}{\text{sen}^2\, u_0}. \tag{17}$$

El concepto de saturación de la guía de luz se extiende tan sólo al caso de incidencia del haz cónico de rayos con abertura $u_1 \leqslant u_0$, ya que el caso cuando $u_1 > u_0$ evidentemente es incorrecto y no efectivo desde el punto de vista de una transmisión de información de alta calidad utilizando un elemento fibroso (véase el p. 5), aunque en este caso, la saturación de la guía de luz de una construcción dada puede ser igual a 1.

La saturación de la guía de luz caracteriza el llenado de su volumen interno en toda la sección por rayos que tienen un ángulo de inclinación respecto al eje entre 0° y $u_{c0} = 90° - j_k$ es decir, por los rayos que se propagan gracias a las reflexiones internas totales. Si en una guía de luz toda la sección y todas las direcciones están llenas por estos rayos, se dice que la guía está totalmente «saturada» de rayos. Si la saturación de una guía de luz es igual a 1, significa que ésta se utiliza en su régimen *óptimo*, o, con otras palabras, se emplea toda su capacidad de transmitir amplios haces de rayos.

Sentido físico de la abertura numérica mayor de 1. Actualmente han sido elaboradas guías de luz, para las cuales la abertura numérica nominal que se calcula por medio de la expresión $\sqrt{n_c^2 - n_u^2}$, resulta mayor de 1. Según la fórmula (3) $\sqrt{n_c^2 - n_u^2}$ es igual a sen u_0 y sen u_0 no puede ser mayor de 1. A base de esto, frecuentemente se afirma que la abertura numérica nominal $A_0 = \text{sen}\, u_0 = \sqrt{n_c^2 - n_u^2} > 1$ no tiene sentido físico. En realidad esta afirmación es incorrecta, ya que la utilización, por ejemplo, de una guía de luz recta de sección constante con caras rectas y que tiene una abertura numérica nominal $\sqrt{n_c^2 - n_u^2}$ mayor de 1, significa sólo que la saturación de esta guía de luz al incidir los rayos desde el aire es menor de 1.

Por lo tanto, el empleo de dicha guía de luz en el caso dado, teniendo aire como medio en la entrada, simplemente no es conveniente, puesto que incluso al incidir desde el aire la radiación difusa en la cara de entrada de la guía de luz es suficiente valerse de una guía de luz con $A_0 = \text{sen}\, u_0 = \sqrt{n_c^2 - n_u^2} = 1$.

Si, en cambio, en la entrada y salida de la guía de luz se encuentra un medio con un índice de refracción $n_1 > 1$ (un caso muy frecuente en la fabricación de aparatos) y desde este medio incide el haz cónico de rayos en la cara de entrada del filamento, mientras que la guía de luz tiene una abertura numérica nominal, por ejemplo $\sqrt{n_c^2 - n_u^2} \leqslant n_1$, entonces de la fórmula (2) se deduce que:

$$\text{sen}\, u_{10} = \frac{\sqrt{n_c^2 - n_u^2}}{n_1} \leqslant 1, \tag{18}$$

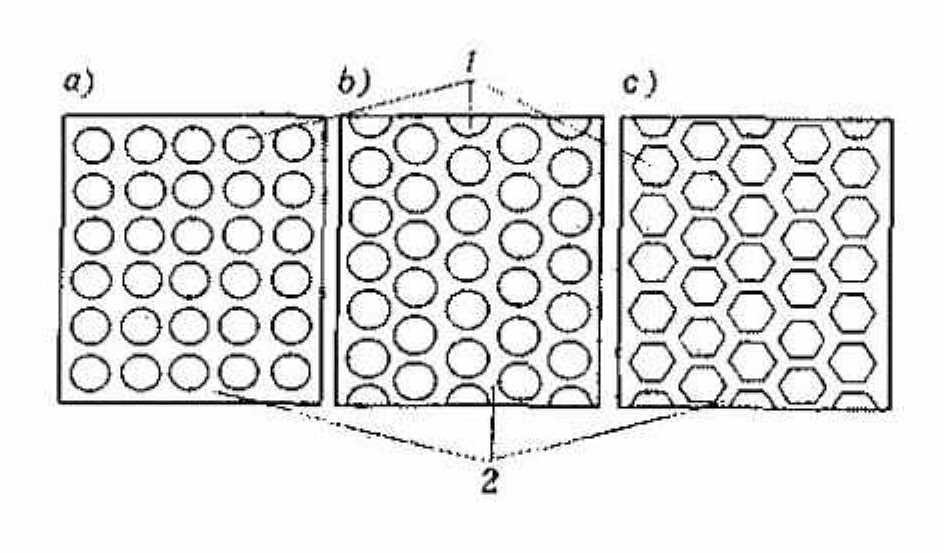
es decir, la expresión $\sqrt{n_c^2 - n_u^2} > 1$ adquiere sentido físico completamente concreto. En particular, para una abertura del haz cónico de rayos u_{10} determinada a partir de la expresión (18), la guía de luz con $\sqrt{n_c^2 - n_u^2} > 1$ funciona en el régimen de saturación, es decir, su saturación es igual a 1. Mientras que en el caso de la incidencia desde un medio de inmersión del haz cónico de rayos con abertura $u_1 > u_{10}$ aparecen rayos fuera de abertura, lo que quiere decir, que en este caso es necesario aumentar el valor $\sqrt{n_c^2 - n_u^2}$. En particular, para que la radiación difusa (es decir, $u_{10} = 90°$) que incide de un medio de inmersión con un índice de refracción n_1 pase totalmente a través de la guía de luz y llegue a su cara de salida, es necesario, como se ve en la expresión (18), que $\sqrt{n_c^2 - n_u^2} = n_1$, es decir, que sea mayor de 1.

5. EFECTO DE LOS TRES ANILLOS: BASE DE LA OPTICA GEOMETRICA DEL HAZ DE GUIAS DE LUZ

La gran mayoría de los elementos fibrosos utilizados en la construcción de aparatos constituyen un haz de guías de luz, o sea, un conjunto de filamentos conductores de luz *1*, separados por capas aisladoras de luz *2* (fig. 18).

Una pieza fibrosa, en general, es un sistema complejo no centrado de microlentes cilíndricos, que tienen el mismo índice de refracción que el filamento y que se encuentran en un medio cuyo índice de refracción es el de la envoltura. Las leyes de la propagación de la radiación a través de un haz de guías de luz se diferencian de las leyes de la transferencia de la luz a través de guías de luz unitarias y monofilares.

Balance de la radiación que se propaga a través de guías de luz. Analicemos una pieza fibrosa sinterizada idealmente transparente con un tendido de filamentos paralelo y con una abertura numérica nominal $A_0 < 1$. Los medios a la entrada y salida de la pieza tienen índices de refracción $n_1 = n_2 = 1$. Al incidir un flujo Φ sobre la cara de entrada de la pieza, éste incide sobre la caras tanto de los filamentos como de las capas intercaladas entre éstos. Como se muestra en el p. 4, si el flujo Φ tiene una abertura $u_1 > u_0$, la parte del flujo contenida en el ángulo de abertura $0 - u_0$, se propaga a través del filamento dado, mientras que los rayos que tienen un ángulo de inclinación mayor de u_0, forman un flujo fuera de abertura. De esta manera, el flujo Φ en la cara de entrada del haz de guías de luz se divide en tres componentes: Φ_n es el flujo útil con abertura u_0, el cual se propaga a través de su filamento conductor de luz y porta la información útil; Φ_b, el flujo fuera de abertura


a)
b)
c)
1
2

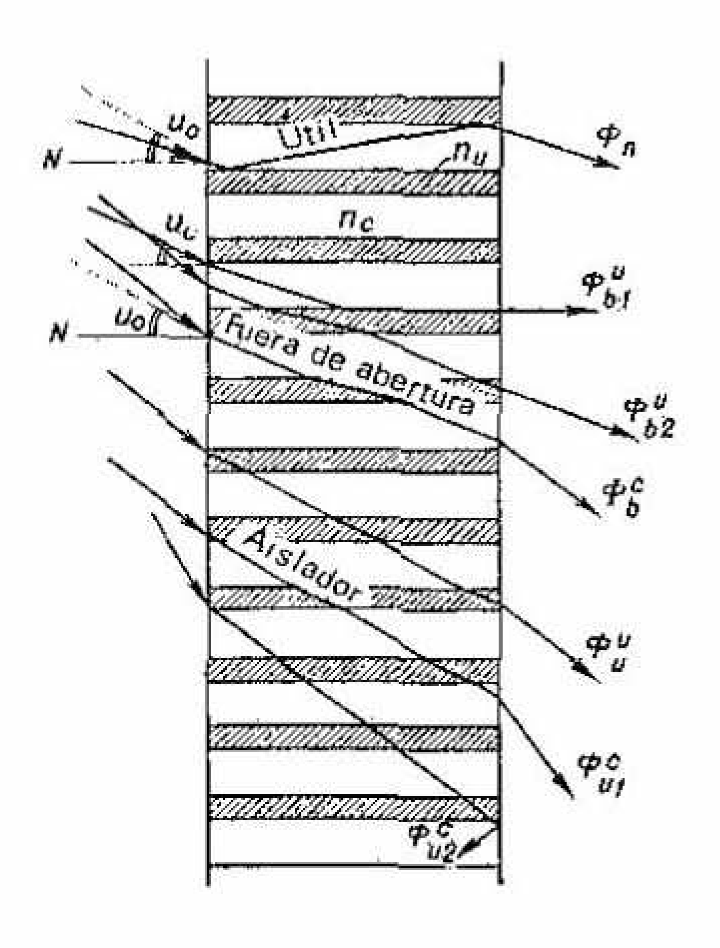

Util
Fuera de abertura
Aislador
N
N

FIG. 18. Colocación de las guías de luz: *a* — cuadrada; *b* — hexagonal; *c* — de sección hexaedra
1—filamento conductor de luz; *2*—capas aisladoras de luz

←——
encerrado en una zona anular cónica desde u_0 hasta u_1 que, por consiguiente, alcanza la superficie lateral de la guía de luz bajo un ángulo menor que el crítico j_k y pasa de sus filamentos al intercalado y a los filamentos vecinos; Φ_u, el flujo que incide sobre las caras de entrada de las capas intercaladas (aisladoras de luz),

$$\Phi = \Phi_n + \Phi_b + \Phi_u. \qquad (19)$$

Los flujos Φ_b y Φ_u llegan hasta la cara de salida de la pieza y caen sobre las caras de salida tanto de los filamentos como del intercalado, es decir, cada uno de ellos se divide en dos partes: la que sale a través de las caras de los filamentos Φ_b^c y Φ_u^c, y la que sale a través de las caras de intercalado Φ_b^u y Φ_u^u. De esta manera, después de salir de la pieza fibrosa, el flujo se divide en cinco componentes:

$$\Phi = \Phi_n + \Phi_b^c + \Phi_b^u + \Phi_u^c + \Phi_u^u, \qquad (20)$$

siendo de estas cinco componentes sólo el flujo Φ_n el portador de la información útil, mientras que las otras cuatro componentes no son operativas y crean en la cara de salida de la pieza un fondo parásito, que disminuye el contraste de la imagen transmitida.

Con ayuda de la ley de la refracción n_1 sen $u_1 =$ $= n_2$ sen u_2 y la gráfica de la fig. 19, la cual representa un corte longitudinal de una pieza fibrosa, se puede demostrar que el ángulo incidente u_1 del flujo Φ en la cara de entrada de la

←——
FIG. 19. Interconexión de ángulos de inclinación de los rayos respecto al eje de una pieza fibrosa en la entrada u_1 y en la salida u_2 de la pieza

pieza y los ángulos de salida u_2 de las diferentes componentes, para los flujos Φ_n, Φ_b^g y Φ_u^u están relacionados por medio de la igualdad

$$u_2 = u_1, \tag{21}$$

y se cumple siempre que para Φ_n, $u_2 < u_0$; para Φ_b^g, $u_2 > u_0$; para el flujo Φ_u^c,

$$\operatorname{sen} u_2 = \sqrt{\operatorname{sen}^2 u_1 + \operatorname{sen}^2 u_0}; \tag{22}$$

para el flujo Φ_b^u,

$$\operatorname{sen} u_2 = \sqrt{\operatorname{sen}^2 u_1 - \operatorname{sen}^2 u_0}. \tag{23}$$

Por las expresiones (21)—(23) se puede apreciar que desde el punto de vista de los ángulos de inclinación en la salida de la pieza fibrosa existen tres flujos: el flujo Φ_b^u sale con menor pendiente que a la entrada y los flujos Φ_n, Φ_b^g, Φ_u^u tienen en la salida un ángulo de inclinación igual que en la entrada, y el flujo Φ_u^c sale de la pieza con mayor pendiente. En la tabla 2 se encuentran las características fundamentales de las componentes del flujo que pasa a través de una pieza fibrosa. En la tabla 3 se dan los ángulos de inclinación de los rayos, en los límites de los cuales del haz de guías de luz salen los rayos de las diferentes componentes del flujo. Como se aprecia en las tablas 2 y 3 cada componente de la radiación que se propaga a través de la pieza tiene sus propiedades ópticas específicas.

Componente Φ_b^u. El ángulo mínimo de salida de los rayos de esta componente se alcanza para $u_1 = u_0$, saliendo los rayos normalmente a la cara de salida de la pieza. Al aumentar u_1, el ángulo de salida u_2 aumenta; sin embargo, todo el tiempo permanece menor que u_1 y no alcanza el valor de 90°.

Componente Φ_u^c. El ángulo de salida mínimo de los rayos es igual a u_0 cuando hay incidencia normal de los rayos sobre la cara de entrada. Al aumentar el ángulo de entrada u_1, el ángulo de salida u_2 crece y, como se ve en la expresión (22), cuando $u_1^k = 90° - u_0$ alcanza 90°, es decir, se desliza por la cara de salida. Si el ángulo de entrada del haz *dirigido* de rayos u_1 es mayor que u_1^k, el componente Φ_u^c experimenta reflexión total interna en las caras de salida de los filamentos y regresa a la cara de entrada de la pieza. Si, en cambio, en la entrada, el haz *cónico* de rayos incide con un ángulo de abertura $u_1 > u_1^k$, la parte Φ_{u1}^c del componente Φ_u^c, confinada en el cono con abertura desde 0 hasta u_1^k, sale de la pieza, mientras que otra parte Φ_{u2}^c, encerrada en la zona anular del cono con abertura desde u_1^k hasta u_1, experimenta reflexión total interna en las caras de salida de los filamentos.

Teniendo en cuenta esta observación, al incidir sobre la entrada de la pieza el haz cónico de rayos con abertura $u_1 > u_1^k = 90° - u_0$, el flujo de entrada Φ se divide en la cara de salida en *seis* componentes

$$\Phi = \Phi_n + \Phi_b^c + \Phi_b^u + \Phi_{u1}^c + \Phi_{u2}^c + \Phi_u^u, \qquad (24)$$

de las cuales la componente Φ_{u2}^c no sale a través de la cara de salida de la pieza, es decir, no rebaja el contraste de la imagen transmitida.

Independientemente de la longitud de las guías de luz, todas las componentes parásitas del flujo «vagan» dentro de la pieza, cambiando continuamente su azimut con relación al eje de ésta. Para ciertos empaquetamientos típicos de los filamentos en la fig. 20 se muestra la proyección del recorrido de los rayos parásitos en la sección transversal del haz de guías de luz. Esta interesante particularidad de la propagación de las componentes no operativas a través de un

Componentes fundamen

Componentes del flujo	Dependencia del ángulo de inclinación u_2 del rayo en la salida de la pieza del ángulo de inclinación u_1 en la entrada
Φ_n — flujo de información que sale a través de la cara del filamento guía de luz, en cuya cara de entrada incide dicho flujo	$\operatorname{sen} u_2 = \operatorname{sen} u_1$
Φ_u^u — flujo a través del revestimiento que incide sobre las caras de entrada de las envolturas aisladoras de luz y sale a través de las caras de salida de éstas	$\operatorname{sen} u_2 = \operatorname{sen} u_1$
$\Phi_{u_1}^c$ — flujo a través del revestimiento que incide en las caras de entrada de las envolturas y sale a través de las caras de salida de los filamentos	$\operatorname{sen} u_1 = \sqrt{\operatorname{sen}^2 u_1 + \operatorname{sen}^2 u_0}$
Φ_{u2}^c — flujo a través del revestimiento que incide en las caras de entrada de las envolturas y llega hasta las caras de salida de los filamentos	Experimenta reflexión total interna en las caras de salida de los filamentos

Tabla 2

tales del flujo que pasa a través de una pieza fibrosa

Ángulos de inclinación u_1 de los rayos en la entrada de la pieza, para los cuales existe una componente dada	Relación entre los ángulos de inclinación del rayo en la entrada u_1 y en la salida u_2	Dependencia del ángulo de inclinación u_2 en la salida de la longitud de onda de la radiación
$0 \leqslant u_1 < u_0$	$u_2 = u_1$	sen $u_2 \neq f\ (\lambda)$
$0 \leqslant u_1 \leqslant 90°$	$u_2 = u_1$	sen $u_2 \neq f\ (\lambda)$
$0 \leqslant u_1 \leqslant u_1^h = 90 - u_0$	$u_2 > u_1$	sen $u_2 = f\ (\lambda)$
$u_1^h \leqslant u_1 \leqslant 90°$	No sale de la pieza	sen $u_2 = f\ (\lambda)$

Componentes del flujo	Dependencia del ángulo de inclinación u_2 del rayo en la salida de la pieza del ángulo de inclinación u_1 en la entrada
Φ_{b1}^{u} — flujo fuera de abertura que incide en la cara de entrada del filamento y sale a través de la cara de salida del revestimiento del mismo	$\operatorname{sen} u_2 = \sqrt{\operatorname{sen}^2 u_1 - \operatorname{sen}^2 u_0}$
Φ_{b2}^{u} — flujo fuera de abertura que incide en la cara de entrada del filamento y emerge a través de las caras de salida de las envolturas de los demás filamentos	$\operatorname{sen} u_2 = \sqrt{\operatorname{sen}^2 u_1 - \operatorname{sen}^2 u_0}$
Φ_{b}^{c} — flujo fuera de abertura que incide en las caras de entrada de los filamentos y emerge a través de las caras de salida de los mismos	$\operatorname{sen} u_2 = \operatorname{sen} u_1$

Tabla 2 (continuación)

Ángulos de inclinación u_1 de los rayos en la entrada de la pieza, para los cuales existe una componente dada	Relación entre los ángulos de inclinación del rayo en la entrada u_1 y en la salida u_2	Dependencia del ángulo de inclinación u_2 en la salida de la longitud de onda de la radiación
$u_0 \leqslant u_1 \leqslant 90°$	$u_2 < u_1$	sen $u_2 = f(\lambda)$
$u_0 < u_1 \leqslant 90°$	$u_2 < u_1$	sen $u_2 = f(\lambda)$
$u_0 < u_1 \leqslant 90°$	$u_2 = u_1$	sen $u_2 \neq f(\lambda)$

Ángulos u_2 en el vértice de las zonas anulares del cono

A_0	u_1 en grados	u_2 en grados para		
		Φ_n	Φ_u^u	Φ_{u1}^c
0,342	30	0—20	0—30	20—37, 20
	60	0—20	0—60	20—68, 35
	90	0—20	0—90	20—90
0,574	30	0—30	0—30	35—49, 35
	60	0—35	0—60	35—90
	90	0—35	0—90	35—90
0,866	30	0—30	0—30	60—90
	60	0—60	0—60	60—90
	90	0—60	0—90	60—90
1	30	0—30	0—30	—
	60	0—60	0—60	—
	90	0—90	0—90	—

Tabla 3

de salida de la pieza fibrosa de los rayos de las componentes de radiación

los componentes

Φ^{c}_{u2}	Φ^{c}_{b}	Φ^{u}_{b}
—	20—30	0—21, 25
	20—60	0—53, 35
regresa parcialmente	20—90	0—70
—	—	—
regresa parcialmente	35—60	0—40, 25
	35—90	0—55
—	—	—
regresa parcialmente	—	—
	60—90	0—30
regresa totalmente	—	—
	—	—
	—	—

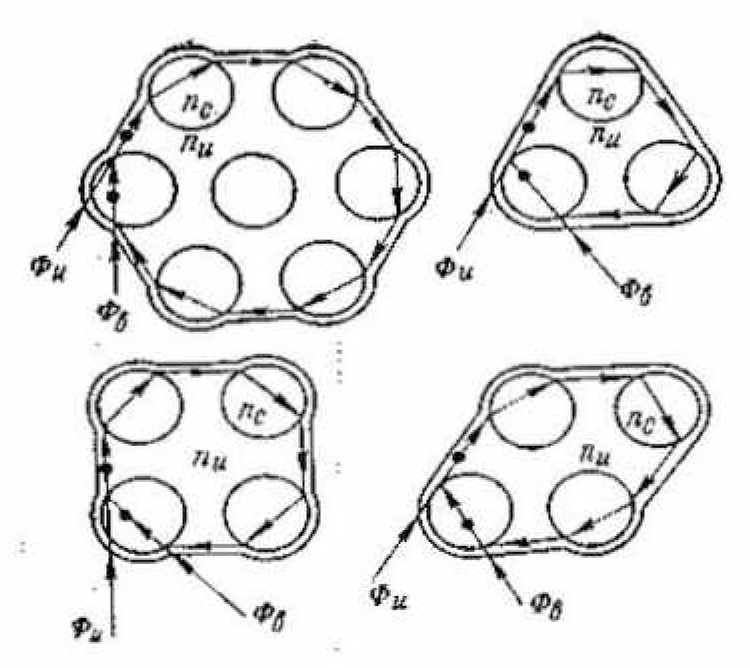


FIG. 20. Proyección del recorrido de los rayos de las componentes Φ_u y Φ_l en la sección transversal del haz de guías de luz

haz de guías de luz conduce a que, cuando sobre la cara de entrada de una pieza fibrosa incide un haz estrecho y dirigido de rayos, éstos forman en la salida un haz cónico anular con una distribución uniforme del flujo en el anillo. En este caso, si $u_1 > u_0$ en el plano perpendicular al eje de la pieza, se ven tres anillos luminosos (fig. 21). Estos últimos se pueden observar fácilmente a ojo o fotografiarlos según el esquema representado en la fig. 22. Para mayor brevedad, el conjunto de todas las leyes de la propagación de la radiación a través de un haz de guías de luz se ha convenido denominarlo *«el efecto de los tres anillos»*.

Rayo límite de reflexion total interna en guías de luz. Las investigaciones del comportamiento de las piezas fibrosas cerca del ángulo crítico de reflexión total interna j_h representan un interés especial; para el caso analizado $j_h = \arcsin \frac{n_u}{n_c}$.

Representemos en una gráfica la dependencia del ángul de refracción j_u del rayo en la envoltura del ángulo de incidencia j de los rayos en la frontera de separación filamento n_c — envoltura n_u. En la fig. 23 está representada esta dependencia para los pares de vidrios БФ25 BF25 (n_c = 1,6076) y K17 (n_u = 1,5163) para una longitud de onda de la radiación incidente $\lambda = 0,5893\ \mu$. Para valores $j < j_k$ (fig. 23.*I*) existen los rayos incidente, refractado (curva *OA*) y reflejado según Fresnel (recta *OB*); para $j > j_h$ (fig. 23.*III*), solamente el incidente y el totalmente reflejado (recta *BC*).

El ángulo de refracción j_k alcanza los 90°, cuando el ángulo de incidencia es igual al valor del ángulo crítico (a este caso en la fig. 23 le corresponden los puntos *A* y *B* de la gráfica y el esquema *II*). Los puntos *A* y *B* son el caso límite de reflexión total interna, para el cual existen el rayo reflejado según Fresnel y el rayo límite que va paralelo al eje de las guías de luz a lo largo de la frontera de separación filamento—envoltura.

Observación del rayo límite. Este fenómeno aplicado a los elementos fibrosos ha sido investigado en el monocromador УМ-2 (UM-2) con mesa rotatoria en la salida, que permite establecer el ángulo de incidencia u_1 de un haz dirigido de rayos en la cara de entrada de la pieza. La cara de salida de la pieza se observó o directamente por medio del ojo, situado cerca de ella, o con ayuda de un microscopio. El ángulo de incidencia u_1 de los rayos meridionales en la cara de entrada de la pieza está relacionado con el ángulo de incidencia de los rayos en la frontera de separación filamento—envoltura por la relación $\cos j = n_c^{-1} \operatorname{sen} u_1$.

Se han investigado las piezas de los vidrios БФ25—К-17 (BF25—K17) con un diámetro de

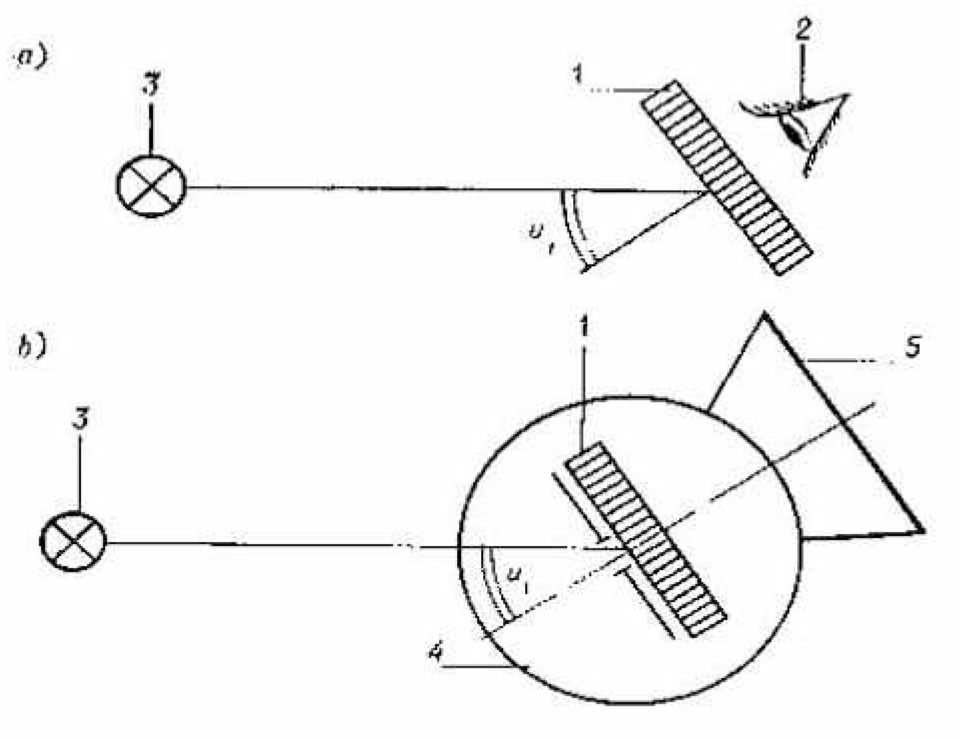
FIG. 21. Fotografía de la distribución de luz de la radiación que sale de un haz de guías de luz de los vidrios БФ25—K17 (BF25—K17) para un ángulo de incidencia de los rayos a la cara de entrada $u_1 > u_0$.

la fibra elemental igual a 20μ y de un espesor del intercalado entre éstos de 4μ. La observación de las caras de salida de las piezas en un monocromador УМ-2 (UM-2), muestra que cuando $u_1 = u_0$ (es decir $j = j_k$), las caras de los filamentos y de las envolturas tienen prácticamente igual iluminación, mientras que las fronteras que los separan se distinguen por un borde brillante (fig. 24), cuya causa es precisamente el caso límite (el ángulo de refracción alcanza 90°). De esta manera, en la fig. 24 queda fijado el rayo límite de reflexión total interna, que corresponde al esquema *II* (fig. 23). En los lugares de la cara de la pieza donde se tiene un exceso de vidrio de revestimiento, es decir, donde el espesor del intercalado es mayor que el doble de la profundidad de penetración del rayo límite, las fibras están separadas no solamente por los bordes brillantes, sino también por el vidrio opaco del revestimiento.

El experimento muestra que la observación del rayo límite de reflexión total interna en las piezas fibrosas de alta calidad no depende de la longitud (por el eje) de las guías de luz ni de sus curvaturas. Así, en los haces flexibles de las fibras de longitud hasta de 0,5 m, el rayo límite se observa prácticamente para cualesquiera que sean curvaturas del manojo, si se conserva la

FIG. 22. Esquema de dispositivos para observar (*a*) y fotografiar (*b*) la distribución de luz de las componentes principales de la radiación que sale de un haz de guías de luz:

1—pieza fibrosa; *2*—ojo; *3*—fuente de luz puntual; *4*—mesa rotatoria con el eje vertical que pasa a través de la cara de la pieza; *5*—placa fotográfica



7 - 01650

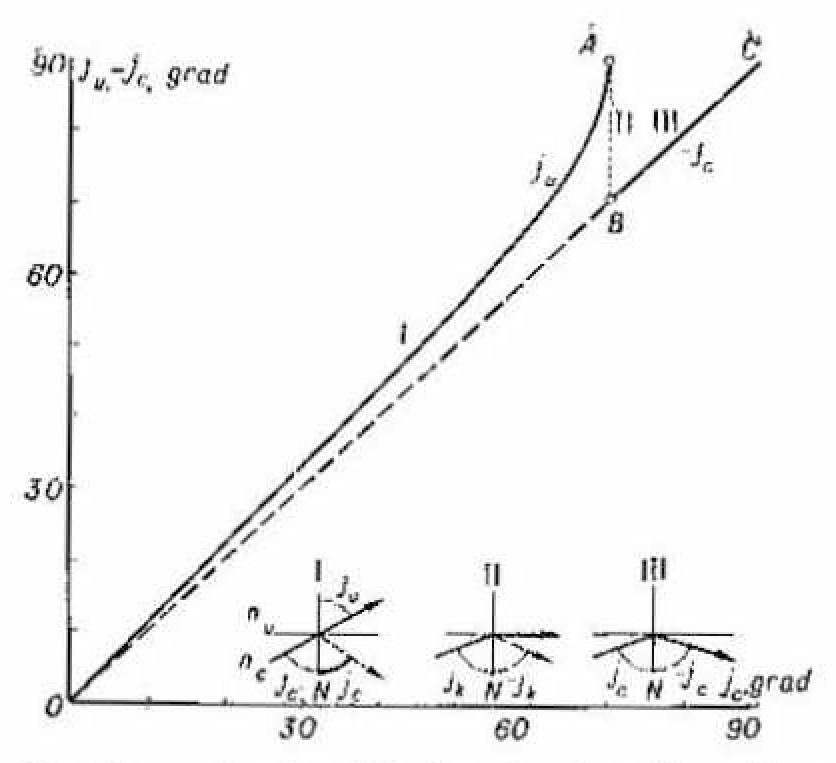


FIG. 23. Dependencia del ángulo de refracción j_u del rayo en la envoltura del ángulo de incidencia j_c de los rayos en la frontera de separación filamento — envoltura

condición de que los rayos en la cara de entrada incidan bajo el ángulo u_0.

Rayo límite y el número de componentes del flujo que se propaga. Como se puede apreciar en la fig. 24, el rayo límite se presenta en forma de un borde brillante alrededor de las caras de salida de los filamentos. Teóricamente, al incidir en la cara de entrada de la guía de luz un haz de rayos rigurosamente paralelo (fig. 25, *a*) con una pendiente $u_0 = \text{arcsen}\sqrt{n_c^2 - n_u^2}$ respecto al eje en la cara de salida del revestimiento, por encima de la frontera filamento—envoltura debe aparecer un punto brillante *1* (fig. 25, *b*) y no la cenefa brillante *2* (fig. 25, *c*) obtenida en el experimento. La observación de una cenefa brillante alrededor de las fibras se explica por la violación de la condición de que el haz de rayos que incide sobre la cara de entrada

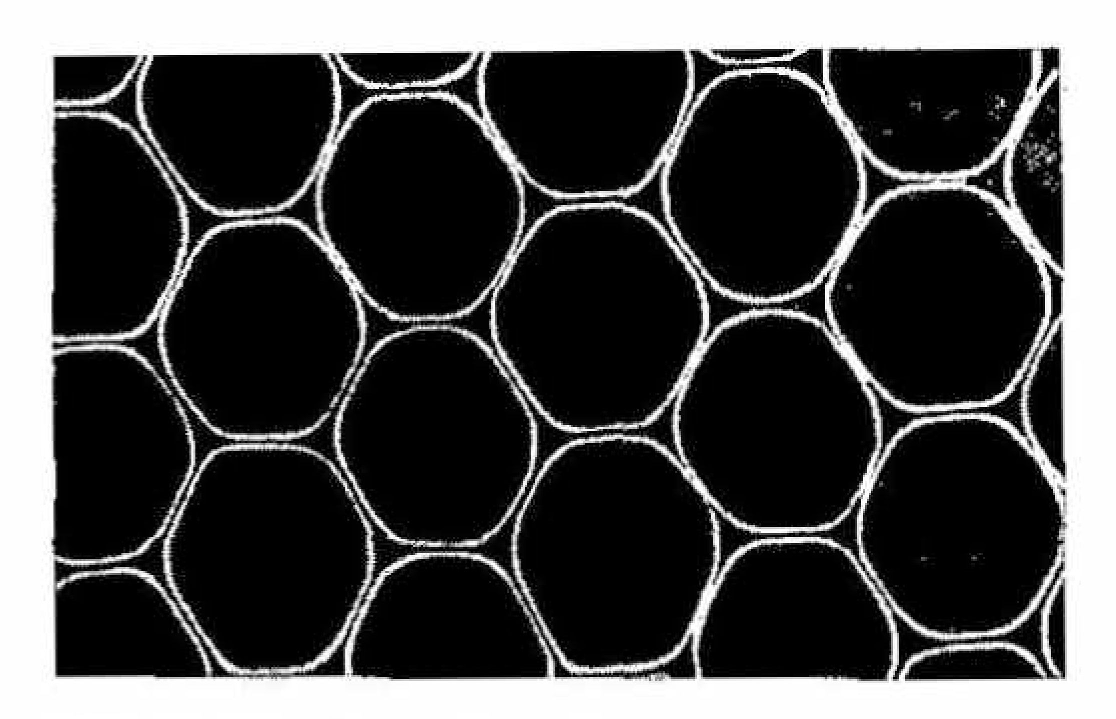
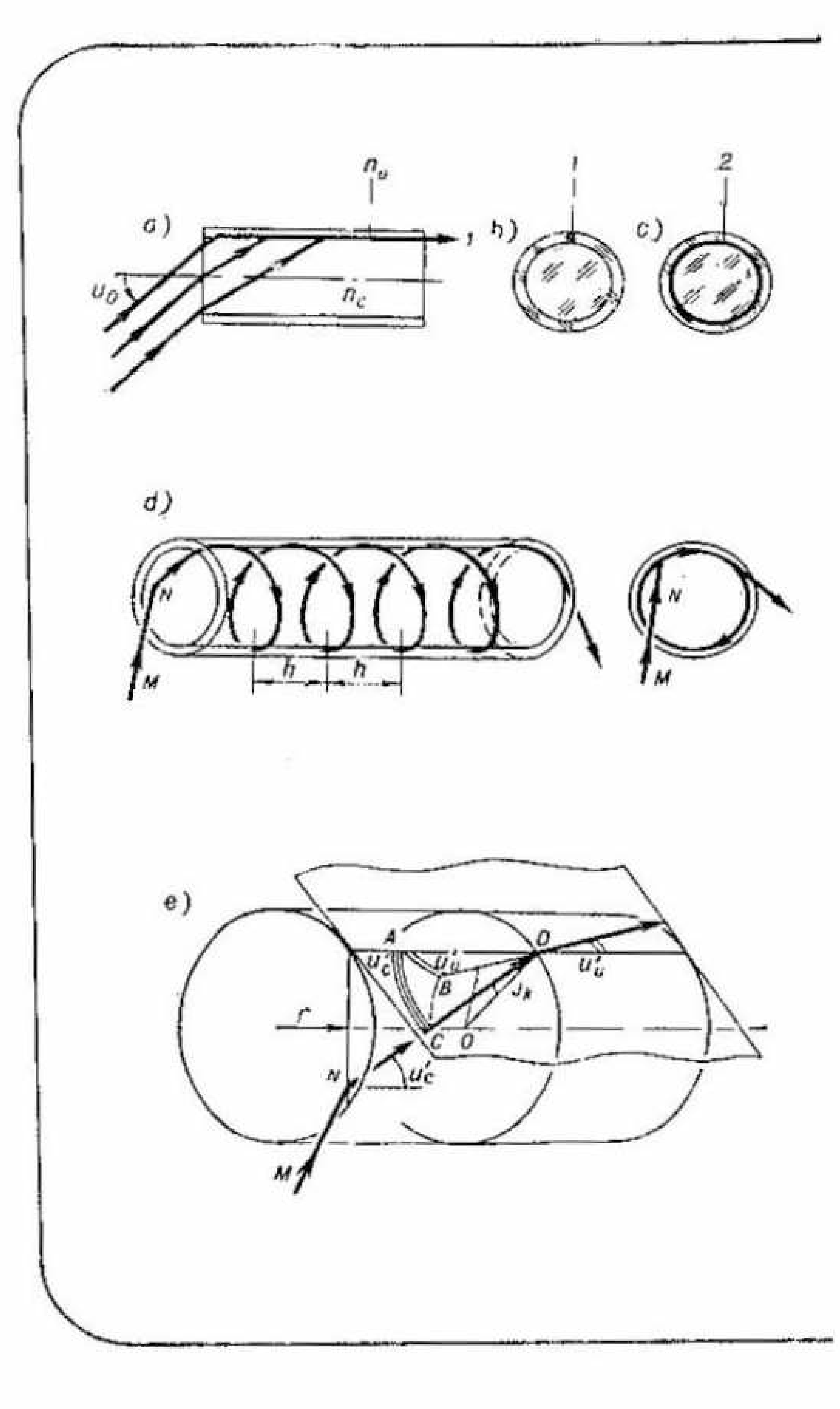


FIG. 24. Microfotografía de la cara de salida de un haz de guías de luz de los vidrios БФ25—K17 (BF25—K17) en caso de la incidencia en la cara de entrada de la radiación dirigida con el ángulo de inclinación $u_1 - u_0$

de las guías de luz sea idealmente paralelo (la abertura del haz de rayos es cerca de 4°) y por la peculiaridad de la propagación del rayo límite a lo largo de la frontera filamento—envoltura.

Como se muestra más adelante, todos los rayos límites reales se propagan a lo largo de la frontera filamento—envoltura de tal manera que el plano del rayo forma cierto ángulo diferente de cero con el eje de la guía de luz, es decir, el rayo límite se propaga siguiendo una línea helicoidal con un determinado paso h (fig. 25, *d*). La trayectoria helicoidal del rayo límite y el carácter finito del grosor del haz de rayos que inciden en la cara de entrada de la guía de luz, conducen al hecho de que en la salida, el rayo límite no se observa en forma de un punto luminoso, sino de una cenefa brillante con una iluminación promediada respecto al área


a)
n_u
n_c
u_0
1
b)
1
c)
2
d)
N
M
h
h
N
M
e)
A
D
u'_c
u'_u
u'_u
B
J_k
r
C
O
N
u'_c
M

de la cenefa independientemente de la distribución de la iluminación en la cara de entrada.

Como se muestra en el p. 4, los rayos del flujo útil Φ_n se propagan a través del filamento siguiendo una línea helicoidal quebrada de rotación a izquierda y a derecha con paso constante. En esta forma, el rayo límite es el caso extremo para el flujo Φ_n, cuando la trayectoria helicoidal quebrada de los rayos dentro del filamento se convierte en una línea helicoidal continua, que se desliza por la frontera de separación filamento—envoltura.

Los rayos del flujo Φ_n y los rayos límites se diferencian no sólo por el caracter de la trayectoria de su propagación. Estos rayos salen de un haz de guías de luz, que están dispuestos paralelamente y tienen una sección constante a lo largo de su longitud, bajo diferentes ángulos: los rayos del flujo útil salen de dicha pieza con una pendiente igual al ángulo de inclinación en la entrada mientras el rayo límite sale bajo un ángulo menor.

En la fig. 25, *e* se muestra el rayo MN, el cual después de su refracción en el punto N de la cara de entrada del filamento alcanza la superficie lateral de la guía de luz bajo el ángulo j_h de reflexión interna total y se propaga alrededor del filamento como rayo límite. Es posible demostrar que este rayo tiene un ángulo u_c' de inclinación respecto al eje de la guía de luz, definido por la expresión:

$$\operatorname{sen} u_c' = \frac{1}{n_c} \sqrt{\frac{n_c^2 - n_u^2}{1 - r^2}}, \qquad (25)$$

⟵

FIG. 25. Propagación del rayo límite de reflexión total interna a través de una guía de luz

donde r es la distancia relativa del rayo desde el eje de la guía de luz (el radio del filamento se toma igual a la unidad); $0 \leqslant r \leqslant 1$.

Teniendo en cuenta la expresión (25), a partir del triángulo esférico $ABCD$ (fig. 25, e) es posible determinar el ángulo u'_u de inclinación del rayo límite con respecto al eje de la guía de luz en la envoltura,

$$\operatorname{sen} u'_u = \frac{r}{n_u} \sqrt{\frac{n_c^2 - n_u^2}{1 - r^2}}. \qquad (26)$$

La última expresión indica que para $0 \leqslant \leqslant r \leqslant 1$, el rayo límite se propaga realmente a lo largo de la frontera filamento—envoltura, formando un ángulo u'_u con el eje de la guía de luz, y puesto que la ecuación (26) es válida para cualquier punto del rayo límite, de esto se deduce el carácter helicoidal de su trayectoria. A base de la expresión (26) encontramos el ángulo u_2^u de salida del rayo límite de las caras de salida de la envoltura de las guías de luz en el aire

$$\operatorname{sen} u_2^u = r \sqrt{\frac{n_c^2 - n_u^2}{1 - r^2}}. \qquad (27)$$

El ángulo u_2^c de salida de los rayos del flujo útil Φ_n de una guía de luz cilíndrico se determina por la expresión

$$\operatorname{sen} u_2^c = \sqrt{\frac{n_c^2 - n_u^2}{1 - r^2}}. \qquad (28)$$

Por las expresiones (27) y (28) se ve que el rayo límite sale de la pieza fibrosa bajo un ángulo menor respecto al eje de la guía de luz, $\operatorname{sen} u_2^u = r \operatorname{sen} u_2^c$, y para él el ángulo de inclinación a la salida es menor que el ángulo de inclinación a la entrada de la guía de luz.

De lo dicho anteriormente se desprende que el rayo límite de reflexión total interna es el

rayo de la componente Φ_b^u, que incluye también a los rayos que inciden en la cara de entrada del filamento formando un ángulo $u_1 > u_0$ y salen a través de las caras de salida de las capas intercaladas. El rayo límite, aunque también incide sobre las caras de entrada de los filamentos y sale a través de las caras de salida del intercalado, se diferencia de los indicados en que sale sólo por las caras de salida de las envolturas de aquellos filamentos en cuya cara de entrada incidió el mismo.

Para los rayos de la componente Φ_b^u que inciden en la cara de entrada de las fibras formando un ángulo u_1, el ángulo de salida u_2 se determina por la fórmula (23). La fórmula (27) no contradice la ecuación (23). En realidad, teniendo en cuenta que el sen u_1 se determina según la expresión sen $u_1 = \sqrt{(n_c^2 - n_u^2)/(1-r^2)}$, y sen $u_0 = \sqrt{n_c^2 - n_u^2}$, se puede mostrar la identidad de las expresiones (27) y (23):

$$\text{sen}\, u_2 = \sqrt{\text{sen}^2 u_1 - \text{sen}^2 u_0} = r \sqrt{\frac{n_c^2 - n_u^2}{1 - r^2}}, \quad (29)$$

es decir, la expresión (27) es válida para una parte de los rayos de la componente Φ_b^u, o sea, precisamente para los rayos límites.

Al aumentar el ángulo u_1 crece la distancia r desde el eje de la guía de luz para la cual el rayo se convierte en rayo límite. Como se ve de la expresión (26), esto conduce a un aumento de la pendiente del plano del rayo límite con respecto al eje de la guía de luz, es decir, a una disminución del paso h de la hélice y a un aumento del ángulo de salida, ecuación (29), del rayo límite de la guía de luz.

La componente Φ_b^u en la distribución luminosa a la salida de la pieza fibrosa produce un anillo interno luminoso en el cual, como se ve

por lo expuesto, están contenidas las dos componentes del flujo, $\Phi_b^u = \Phi_{b1}^u + \Phi_{b2}^u$; Φ_{b1}^u es el flujo que sale de la cara de salida de la envoltura de aquel filamento en cuya cara de entrada precisamente dicho flujo incidió (rayo límite), y Φ_{b2}^u es el flujo que sale de las caras de salida de las envolturas de los demás filamentos, es decir, el flujo que llega hasta las caras de salida de las envolturas gracias a refracciones múltiples y a reflexiones de Fresnel en las fronteras filamento—envoltura y envoltura—filamento. En caso dado, los ángulos de inclinación u_1 de los rayos a la entrada del filamento, bajo los cuales existen los flujos Φ_{b1}^u y Φ_{b2}^u que forman la componente Φ_b^u, están limitados por los siguientes intervalos: $u_0 \leqslant u_1 \leqslant 90°$ para Φ_{b1}^u y $u_0 < u_1 \leqslant$ $\leqslant 90°$ para Φ_{b2}^u.

En esta forma, la componente Φ_b^u de la radiación que se propaga por un haz de guías de luz, está compuesta de dos flujos. Ambos flujos que forman la componente Φ_b^u salen bajo un mismo ángulo de inclinación respecto al eje de la pieza fibrosa, pero uno de ellos, el compuesto por los rayos límite, es el portador de información *útil* para la imagen, y el otro que sale de las envolturas de los filamentos vecinos, tan sólo disminuye el contraste. Teniendo en cuenta lo dicho, la fórmula (24) adquiere la forma

$$\Phi = \Phi_n + \Phi_b^c + \Phi_{b1}^u + \Phi_{b2}^u + \Phi_{u1}^c + \Phi_{u2}^c + \Phi_u^u, \quad (30)$$

es decir, el flujo Φ que incide en la cara de entrada del haz de guías de luz se divide en *siete* componentes.

Variación del efecto de los tres anillos en las piezas fibrosas. Para cualquier pieza hecha de fibra, los casos más característicos de incidencia de un haz dirigido de rayos sobre la cara de

entrada y que finalmente determinan los parámetros ópticos de la pieza son los siguientes: 1) el ángulo de incidencia del haz dirigido de rayos en la cara de entrada de la pieza $u_1 = 0$; 2) $0 < u_1 < u_0$; 3) $u_1 = u_0$; 4) $u_0 < u_1 < u_1^h = 90° - u_0$; 5) $u_1 \geqslant u_1^h$.

La distribución luminosa sobre la salida de la pieza fibrosa descubre la variación del efecto de los tres anillos para los cinco casos característicos indicados de propagación de la radiación a través de un haz de guías de luz, y comprueba la aparición y desaparición de las diferentes componentes del flujo.

Variación del efecto de los tres anillos en un flujo monocromático. Para la investigación del efecto de los tres anillos en los casos más característicos, se utiliza el monocromador УМ-2 (UM-2) con la mesa giratoria *4* a la salida (fig. 26, *a*). La mesa giratoria sirve para hacer variar el ángulo de incidencia u_1 de los rayos a la entrada de la pieza fibrosa *6*. La distribución de la luz en el espacio a la salida de la pieza se registra por medio de una placa fotográfica *7*. La pieza que se investiga, se coloca en la mesa giratoria de tal manera que el eje de giro de la mesa pase a través del plano de la cara de entrada de la pieza. En la mesa giratoria, los planos del chasis y de la cara de salida de la pieza se colocan paralelos. La distancia de la cara de salida de la pieza a la placa fotográfica se mantienen constante en todos los experimentos con el objeto de tomar fotografías de la distribución luminosa en diferentes casos y para una misma escala.

Para los cinco casos arriba enunciados, según el esquema de la fig. 26, *a*, se han fotografiado las distribuciones luminosas de una radiación monocromática de longitud de onda de 0,550 μ a la salida de la pieza fibrosa (fig. 27) con un

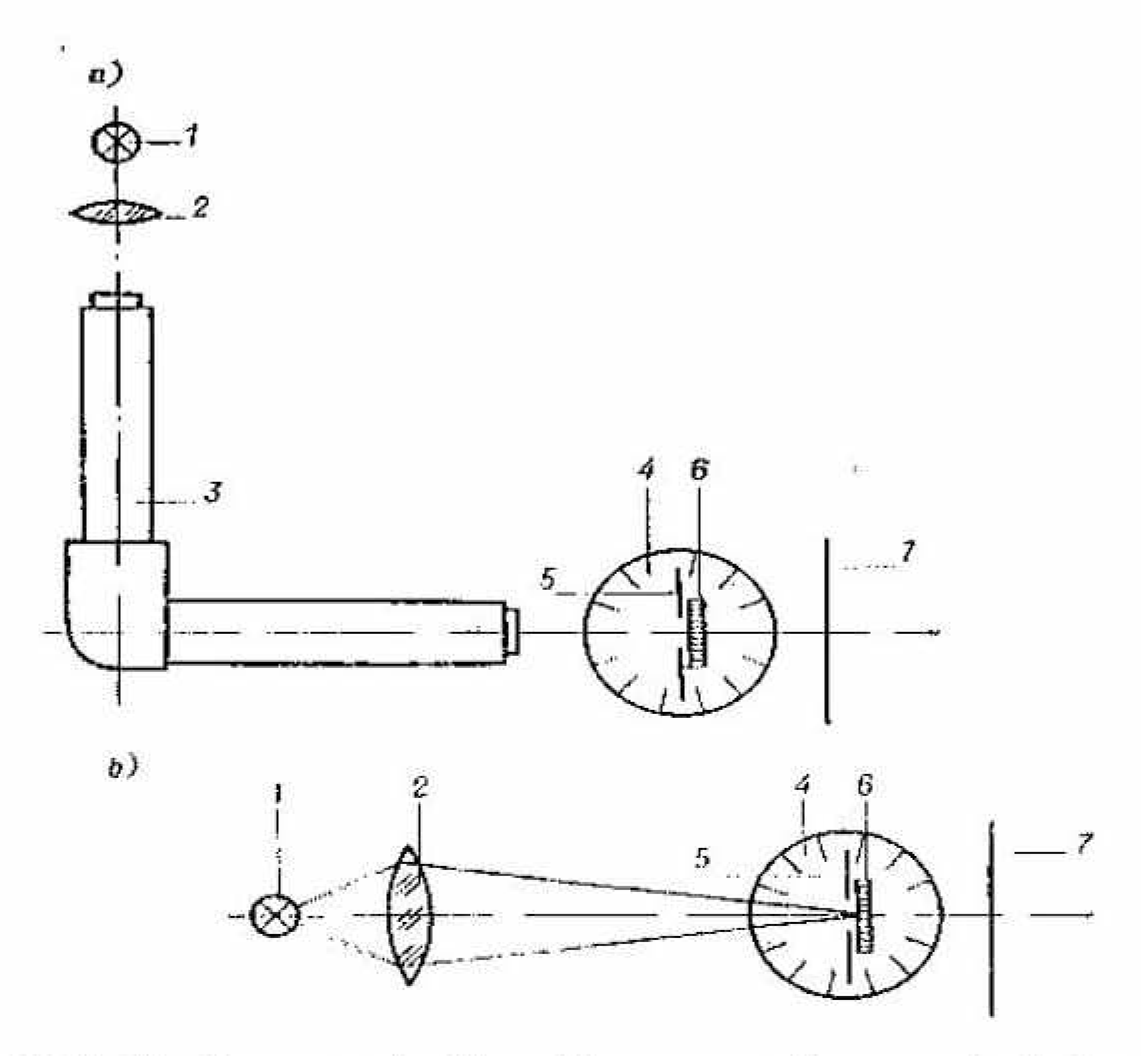


FIG. 26. Esquema de dispositivos para observar el efecto de los tres anillos con luz monocromática (*a*) y blanca (*b*):
1—fuente de luz; *2*—condensador; *3*—monocromador УМ-2 (UM-2); *4*—mesa giratoria; *5*—diafragma; *6*—pieza fibrosa que se investiga; *7*—placa fotográfica (pantalla)

empaquetamiento paralelo de las guías de luz de vidrios БФ25—К17 (BF25-K17) (véase la fig. 10.) Las caras de la pieza son planas paralelas y perpendiculares al eje de las guías de luz. En las condiciones del experimento considerado, los medios a la entrada y salida de la pieza tienen un índice de refracción $n_1 = 1$ (aire).

En la figura 27, *a* se muestra la distribución luminosa de la radiación que sale de una pieza, para una incidencia normal ($u_1 = 0$) del haz de

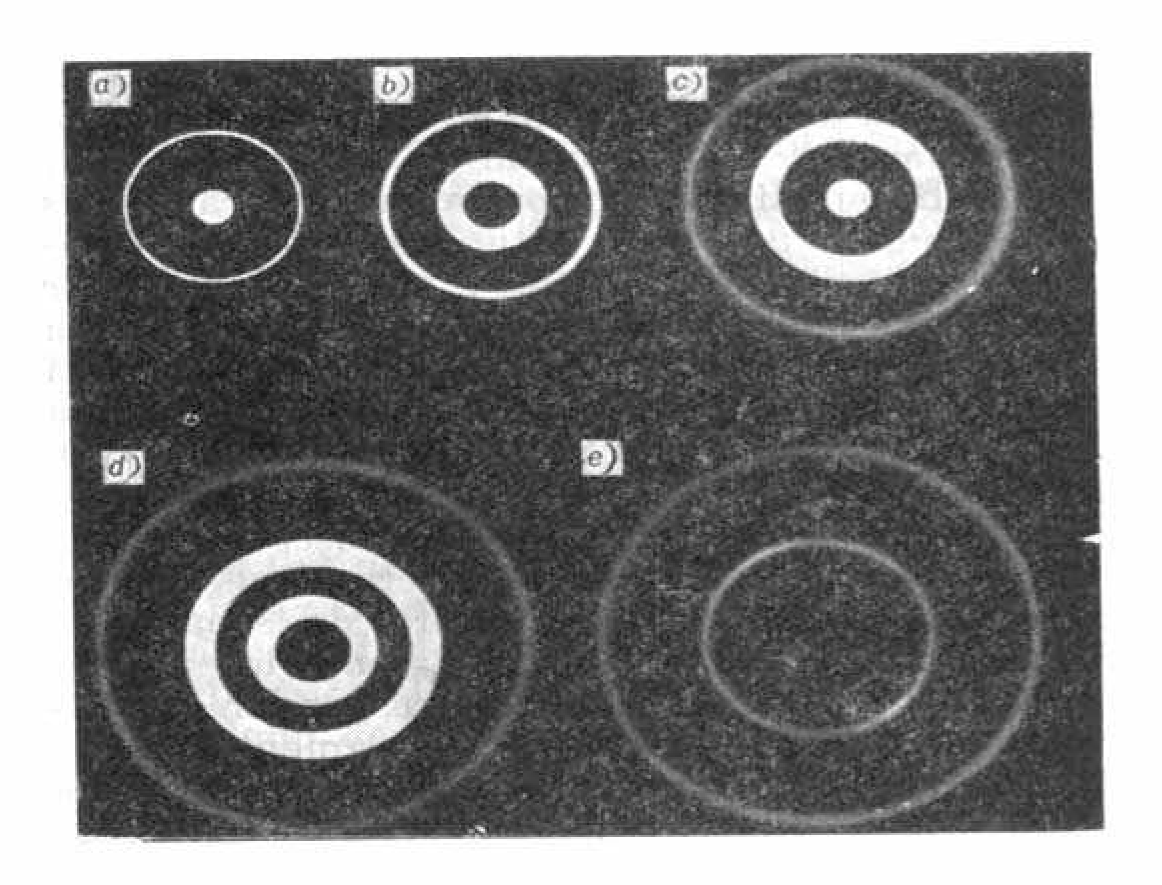


FIG. 27. Variación del efecto de los tres anillos con luz monocromática

rayos dirigido a la cara de entrada de la pieza. La mancha luminosa corresponde a las componentes $\Phi_n + \Phi_u^u$ del flujo, y el anillo luminosa, a la componente Φ_u^c. Como se aprecia en la figura 27, *a* para las componentes Φ_n y Φ_u^u, el ángulo de salida de la pieza es $u_2 = u_1 = 0$, mientras que para Φ_u^c tenemos $u_2 > u_1 = 0$.

La figura 27, *b* muestra la distribución luminosa en la salida de una pieza para un ángulo de incidencia $u_1 = 18°$. Las componentes del flujo saliente permanecen iguales a las del caso anterior, pero para $0 < u_1 < u_0$, la mancha central $\Phi_n + \Phi_u^u$ se transforma en un anillo luminoso, mientras que el anillo exterior Φ_u^c aumenta su diámetro. Para las componentes Φ_n y Φ_u^u tenemos $u_2 = u_1$ y para Φ_u^c $u_2 > u_1$.

En la tabla 2 se puede ver que para $u_1 = u_0$ en la salida de la pieza debe aparecer una componente más Φ_b^u del flujo, la cual para $u_1 = u_0$ debe salir en dirección normal a la cara de las guías de luz ($u_2 = 0$). Esta conclusión se comprueba experimentalmente, y en la figura 27, *c* se muestra la distribución luminosa a la salida de la pieza para $u_1 = u_0$: la mancha luminosa interior es la componente Φ_b^u. Como se aprecia en la figura 27, *c*, para esta componente $u_2 = 0$, aunque $u_1 \neq 0$. La aparición de la componente Φ_b^u corresponde al caso en el que se observa el rayo límite de la reflexión total interna que se propaga a lo largo de la frontera de separación filamento—envoltura. Para $u_1 = u_0$, los anillos luminosos exteriores que corresponden a las componentes $\Phi_n + \Phi_u^u$ y Φ_u^c aumentaron de diámetro gracias al aumento del ángulo de salida u_2.

Para $u_0 < u_1 < u_1^k$, la mancha luminosa interior Φ_b^u se transforma en un anillo, mientras que los anillos exteriores aumentan su diámetro (fig. 27, *d*). Además, si los anillos exterior e interior, como antes corresponden a las componentes Φ_u^c y Φ_b^u entonces el anillo central corresponde a Φ_u^u y Φ_b^c, ya que para un ángulo u_1 de incidencia de los rayos en la cara de entrada de la pieza mayor que la abertura nominal u_0 de las guías de luz no puede haber flujo útil. En lugar de la componente Φ_n aparece la componente Φ_b^c; los rayos que han incidido en las caras de entrada de los filamentos y han salido a través de las caras de salida de los demás filamentos.

Finalmente, para $u_1 \gg u_1^k$, el anillo exterior Φ_u^c debe desaparecer, puesto que la componente Φ_u^c para $u_1 > u_1^k$ debe experimentar una reflexión total interna en las caras de salida de los filamentos. Esto se confirma experimentalmente. En la figura 27, *e* se muestra la distribución

luminosa sobre la salida de una pieza para $u_1 = 60° > u_1^h$, de la cual se ve que han quedado tan sólo dos anillos correspondientes a las componentes Φ_b^u y $\Phi_u^u + \Phi_b^c$, las que comparadas con el caso anterior (fig. 27, *d*) han aumentado de diámetro. El anillo exterior Φ_u^c, en cambio, ha desaparecido completamente. Esto confirma su reflexión total interna en las caras de salida de los filamentos.

Características espectrales del efecto de los tres anillos. Como se ve en la tabla 2, el ángulo de salida de los rayos de la pieza para las componentes Φ_u^c y Φ_b^u depende de la abertura numérica nominal A_0 de las guías de luz. Esta última es función de la longitud de onda de la radiación (véase la fig. 10). Esto conduce a que, para un ángulo dado de incidencia u_1 de los rayos sobre la cara de entrada de pieza, los ángulos de salida u_2 para rayos con distintas longitudes de onda no son iguales. Al aumentar la longitud de onda de la radiación, la abertura nominal de las guías de luz disminuye, es decir, a base de las fórmulas de la tabla 2 se nota que la radiación de onda larga para Φ_u^c sale de la pieza bajo un ángulo menor, mientras que para Φ_b^u, bajo un ángulo mayor u_2. Esto debe originar la descomposición de la luz blanca a la salida de la pieza en los anillos interior y exterior y además con una distribución contraria de los colores en ellos.

Las peculiaridades espectrales del efecto de los tres anillos, es decir, la dependencia del ángulo de salida de los rayos de la pieza de la longitud de onda de la radiación se analiza según un principio análogo al experimento en luz monocromática con la instalación de una fuente de luz blanca (fig. 26, *b*).

Cuando u_1 es igual a cero, en la fotografía de la distribución luminosa sobre la salida de la pieza (fig. 28, *a*), en el centro de la figura se

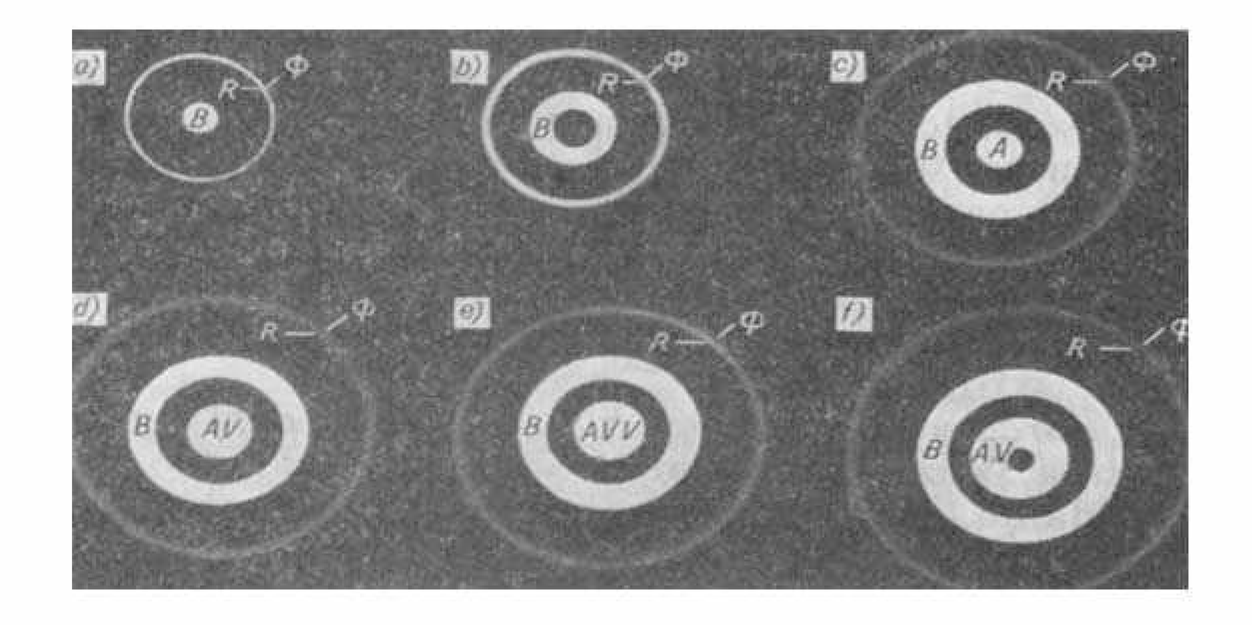


FIG. 28. Variación del efecto de los tres anillos con luz blanca

obtiene una mancha luminosa blanca (las componentes Φ_n y Φ_u^u) y un anillo coloreado exterior Φ_u^c con una variación continua de colores, desde el rojo (en la parte interna del anillo) hasta el violeta (en la periferia).

Cuando $u_1 = 18° < u_0$, la mancha central se transforma en anillo, que como antes se mantiene blanco, mientras que el anillo exterior aumenta de diámetro, conservando la misma distribución de los colores (fig. 28, *b*).

Con $u_1 = 31°50' = u_0$, para $\lambda = 0{,}700\mu$, los anillos coloreados blanco y externo aumentan de diámetro, mientras que en el centro aparece una mancha roja Φ_b^u (fig. 28, *c*), la cual al aumentar el ángulo u_1 se convierte en anillo, y en el centro aparecen los colores siguientes (de longitud de onda más corta), etc. En la figura 28, *d* se aprecia la aparición de una mancha verde ($u_1 = 32°30' = u_0$ para $\lambda = 0{,}550\mu$); en la figura 28, *e*, de una violeta ($u_1 = 34°30' = u_0$ para $\lambda = 0{,}400\mu$). Finalmente, cuando $u_1 = 36°$, la mancha de color

violeta se transforma en anillo (fig. 28, *f*). El aumento ulterior del ángulo u_1 conduce a un crecimiento del diámetro de los anillos; la distribución de los colores en los anillos interno y externo se conserva, mientras que el anillo central permanece blanco. Como se ve en la fig. 28, *f*, la distribución de los colores en los anillos exterior e interior es contraria.

Efecto de los tres anillos y los principios de utilización de elementos fibrosos en la construcción de aparatos. Como se aprecia en lo expuesto anteriormente, el efecto de los tres anillos describe las leyes que rigen la propagación de una radiación a través de un haz de guías de luz, es decir, determina todas las características ópticas de una pieza fibrosa. Por esta razón, el efecto de los tres anillos determina los principios de la aplicación de los elementos fibrosos en la construcción de aparatos, debe siempre tenerse en cuenta al utilizar piezas fibrosas en sistemas ópticos y electrónico-ópticos concretos.

Magnitud de las componentes fundamentales del flujo. Cuando en un dispositivo se utilizan elementos fibrosos, en el contraste de la imagen transmitida influyen no solamente las aberturas de salida de las diferentes componentes del flujo, sino también su magnitud.

El coeficiente τ_5 de relleno de la cara de entrada de un haz de guías de luz de los filamentos determina qué parte del flujo Φ incidente en la cara de entrada de una pieza fibrosa, cae sobre las caras de los filamentos. En el capítulo II se dijo que el coeficiente de transmisibilidad geométrica τ_1 indica qué parte del flujo que incide en la cara de entrada de una fibra se propaga en ésta como flujo útil Φ_n. De esta manera, del flujo incidente Φ, queda como útil solamente aquella parte que es igual a $\tau_1\tau_5$. Análogamente se pueden determinar las

magnitudes de las demás componentes por separado del flujo que se propaga a través del haz de guías de luz. Estas fórmulas son:

$$\left.\begin{aligned}\Phi_n &= \tau_1\tau_5\Phi;\\ \Phi_u^u &= (1-\tau_5)^2\,\Phi;\\ \Phi_u^c &= (1-\tau_5)\,\tau_5\Phi;\\ \Phi_b^u &= (1-\tau_1)\,(1-\tau_5)\,\tau_5\Phi;\\ \Phi_b^c &= (1-\tau_1)\,\tau_5^2\Phi.\end{aligned}\right\} \qquad (31)$$

En la tabla 4 se muestran las magnitudes de las diferentes componentes del flujo que *llega* hasta la cara de salida de la pieza, calculadas por medio de las fórmulas (31) para diferentes valores de A_0, τ_5 y u_1. El flujo entrante Φ se ha tomado igual a 1. Como se ve en la tabla 4, la magnitud relativa del flujo útil Φ_n aumenta al disminuir la abertura u_1 del haz incidente de rayos hasta el valor u_0, al crecer el coeficiente de relleno de la cara de los filamentos y al aumentar la abertura nominal u_0 de las guías de luz.

El flujo fuera de abertura Φ_b no existe cuando $A_0 = 1$; en este caso tampoco existe el flujo Φ_{u1}^c. La componente Φ_u^c en forma de flujo Φ_{u2}^c se refleja hacia atrás totalmente en la cara de salida de las fibras, si el medio que está a la salida tiene un índice de refracción $n_2 = 1$. La componente Φ_u^u existe para cualesquiera τ_1, A_0 y u_1.

Necesidad de concordancia de las aberturas del sistema. Como se ve en las expresiones (21)—(25) y las tablas (3) y (4), la abertura de salida de las componentes Φ_b^u y Φ_u^c depende de la abertura numérica de las guías de luz, mientras que la de las componentes Φ_n, Φ_b^c y Φ_u^u no depende de la misma; además el flujo útil Φ_n se encuentra tan sólo dentro de cono con abertura u_0. La magni-

tud y la abertura de salida de las componentes no operativas del flujo no ejercen la misma influencia en la disminución del contraste de la imagen transmitida. Cuanto mayor es el número de rayos de las componentes no operativas que se capta en el receptor, tanto menor es el contraste de la imagen transmitida.

Si en la entrada de las caras del haz de guías de luz incide un haz cónico de rayos con *abertura* $u_1 \leqslant u_0$, entonces la componente Φ_u^u en el flujo saliente también queda incluida en el cono con abertura u_1, mientras que Φ_u^c queda en la zona anular del cono con abertura mayor de u_0. Por esta razón, para una abertura de entrada $u_2 \leqslant \leqslant u_0$ del receptor (por ejemplo, el ocular), éste último capta los rayos de las componentes Φ_n y Φ_u^u, es decir, el contraste de la imagen disminuirá a expensas de los rayos Φ_u^u; pero si $u_2 > u_0$, el contraste disminuye a cuenta de los rayos del flujo Φ_u^c. Por esta razón no debe permitirse un exceso del valor de la abertura de entrada del receptor por encima del valor u_0.

Si, en cambio, en la cara de entrada de la pieza fibrosa incide un haz cónico de rayos con *abertura* $u_1 > u_0$, entonces los rayos de la componente Φ_u^u salen en todas las direcciones desde 0 hasta $u_2 = u_1$, los rayos de la componente Φ^u_b en las direcciones desde 0 hasta u_2, ángulo determinado a partir de la expresión (23). Para una abertura de entrada $u_2 \leqslant u_0$ del receptor éste capta además de los rayos Φ_n cierta parte de rayos de las componentes Φ_u^u y Φ_b^u. Si la abertura de entrada del receptor es mayor de u_0, no solamente aumenta la parte de los rayos captados de los flujos Φ_u^u y Φ_b^u, sino que empiezan a captarse también rayos de las componentes Φ_u^c y Φ_{u1}^c, es decir, al ser excedente el valor de la abertura del flujo entrante y la abertura de entrada del receptor a la salida de la pieza al

Valores de las componentes de

τ_6	A_0	u_1 en grad.	Φ_n	Φ_u^u
0,4	0,342	30 60 90	0,187 0,062 0,047	0,360
	0,574	30 60 90	0,400 0,176 0,132	
	0,866	30 60 90	0,400 0,400 0,300	
	1,000	30 60 90	0,400	
0,8	0,342	30 60 90	0,375 0,125 0,094	0,040
	0,574	30 60 90	0,800 0,352 0,264	
	0,866	30 60 90	0,800 0,800 0,600	
	1,000	30 60 90	0,800	

Tabla 4

la radiación que pasa a través de una pieza fibrosa

Φ^c_{u1}	Φ^c_{u2}	Φ^c_b	Φ^u_b
0,240 0,240 0,212	— — 0,028	0,085 0,135 0,141	0,128 0,203 0,212
0,240 0,215 0,161	— 0,025 0,079	— 0,090 0,107	— 0,134 0,161
0,240 0,080 0,060	— 0,160 0,180	— — 0,040	— — 0,060
—	0,240	—	—
0,160 0,160 0,141	— — 0,019	0,340 0,540 0,565	0,085 0,135 0,141
0,160 0,143 0,107	— 0,017 0,053	— 0,358 0,429	— 0,090 0,107
0,160 0,053 0,040	— 0,107 0,120	— — 0,160	— — 0,040
—	0,160	—	—

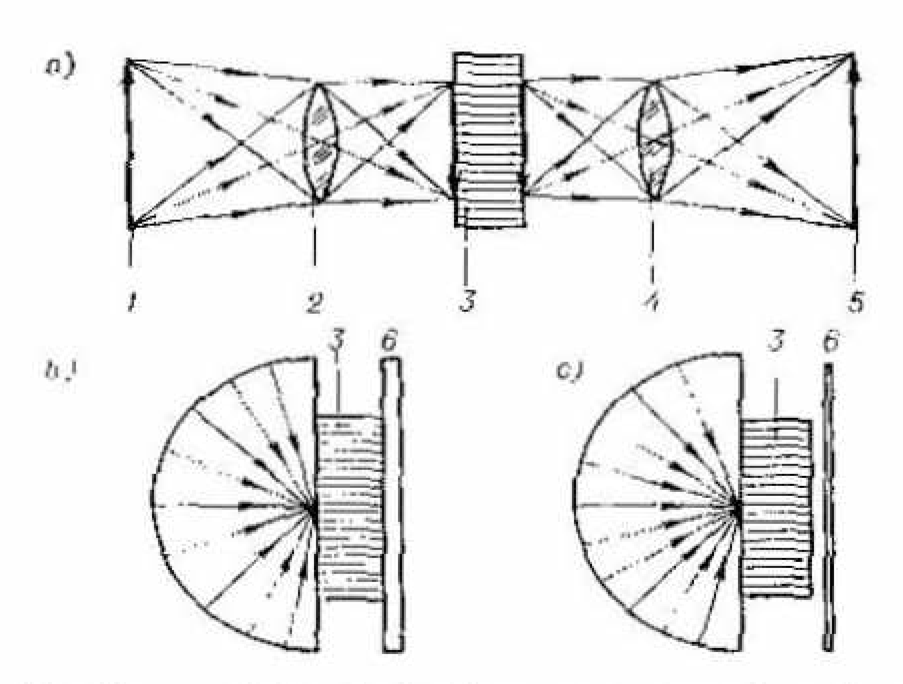


FIG. 29. Transmisión de la imagen por un haz de guías de luz

valor u_0, aumenta el flujo no operativo, el cual disminuye el contraste de la imagen.

Hay que anotar que en ambos casos la componente Φ_u^u junto con el flujo Φ_n, sin depender de las características de las aberturas del radiador y del receptor, se capta obligatoriamente (en forma total o parcial) por el receptor, lo que conduce a una disminución del contraste de la imagen.

De esta manera, se puede deducir la importancia del principio de la aplicación de los elementos fibrosos en la construcción de aparatos, el cual está regido por el efecto de los tres anillos: es indispensable hacer concordar la abertura del haz de entrada de los rayos con la del haz de guías de luz y la del receptor de radiación a la salida de la pieza. Aclaremos la conclusión anterior con ejemplos concretos.

Analicemos el sistema (fig. 29, *a*) compuesto del objetivo *2* que proyecta la imagen del objeto *1* en la cara de entrada de la pieza fibrosa *3*. La

imagen de la cara de salida del haz de guías de luz por medio del objetivo *4* se proyecta sobre la pantalla *5* (el plano de la imagen). Las aberturas de salida y las magnitudes de las diferentes componentes del flujo captadas por el objetivo receptor *4* se determinan con ayuda de los datos que se encuentran en las tablas 3 y 4. La calidad de la imagen se caracteriza por el coeficiente K de transmisión de contraste por el haz de guías de luz, definido como la razón entre el flujo útil Φ_n captado por el receptor y la suma de todos los flujos que inciden sobre el objetivo receptor.

Supongamos que la abertura numérica de las guías de luz es $A_0 = 0{,}574$ ($u_0 = 35°$) y el coeficiente de relleno de la cara por los filamentos es igual a 0,4. Para una abertura del haz de rayos incidente $u_1 = 60°$ y una abertura de entrada del objetivo receptor $u_2 = u_0 = 35°$, en el objetivo *4* cae todo el flujo útil Φ_n y parte de los flujos Φ_u^u y Φ_b^u. El coeficiente de transmisión de contraste K_1 será en este caso

$$K_1 = \frac{\Phi_n}{\Phi_n + \Phi_u^u + \Phi_b^u} = 0{,}325.$$

Si la razón entre las aberturas es contraria a la del caso analizado, es decir, $u_1 = u_0 < u_2$, por ejemplo, $u_2 = 60°$, entonces en el objetivo receptor caen totalmente el flujo útil Φ_n y las componentes no operativas Φ_u^u, y Φ_{u1}^c. En este caso,

$$K_1 = \frac{\Phi_n}{\Phi_n + \Phi_u^u + \Phi_{u1}^c} = 0{,}400.$$

Pero si para la pieza fibrosa analizada $u_1 > u_0 < < u_2$, por ejemplo $u_1 = u_2 = 60°$, en el objetivo receptor inciden en forma total los flujos Φ_n, Φ_u^u, Φ_b^u y Φ_b^c y parte del flujo Φ_{u1}^c. El coefi-

ciente de transmisión de contraste es

$$K_1=\frac{\Phi_n}{\Phi_n+\Phi_u^u+\Phi_{u1}^c+\Phi_b^u+\Phi_b^c}=0{,}196.$$

Como vemos, tal relación de las aberturas en el sistema es completamente inaplicable.

Para una pieza fibrosa escogida con $A_0 = 0{,}574$ y cuando hay concordancia de las aberturas de los objetivos iluminante y receptor y de las guías de luz, el coeficiente de transmisión de contraste resulta ser el más alto, puesto que para $u_1 = u_0 = u_2 = 35°$, en el objetivo receptor caen completamente sólo los flujos Φ_n y Φ_u^u. Para este caso

$$K_1=\frac{\Phi_n}{\Phi_n+\Phi_u^u}=0{,}530. \qquad (32)$$

Para el último caso, el cambio de la pieza fibrosa con $A_0 = 0{,}574$ por un haz de guías de luz con una abertura propia más alta no produce un aumento del coeficiente de transmisión de contraste; como antes el valor de éste es igual a 0,530. Para todos los casos anteriores, cuando u_1, ó u_2 o las dos aberturas u_1 y u_2 son iguales a 60°, es necesario utilizar una pieza fibrosa con $A_0 = 0{,}866$. Este cambio para todas las cuatro variantes analizadas asegura un coeficiente de transmisión de contraste de 0,530. En esta ocasión, para todas las cuatro variantes de la relación u_1, u_0, u_2 se tiene $K_1 = 0{,}530$. Esto se explica por la relación de las aberturas (se cumple la condición $u_1 \leqslant u_0 \geqslant u_2$), es decir, las aberturas de todos los elementos del sistema *están adaptadas* suficientemente.

Los ejemplos analizados demuestran que, una estricta adaptación de las aberturas numéricas del objetivo, de la pieza fibrosa y del objetivo receptor eleva considerablemente el coeficiente

de transmisión del contraste, mientras que un exceso injustificado de la abertura numérica de los objetivos iluminante o receptor por encima del valor A_0 conduce a una disminución del contraste de la imagen a la salida del sistema. Por esta razón, es necesario que el receptor posea una abertura igual a la abertura del cono de rayos que incide sobre la cara de entrada, pero que no sobrepase la abertura nominal de las guías de luz, es decir,

$$u_1 = u_2 \leqslant u_0. \qquad (33)$$

Caso de una radiación y recepción difusas. Frecuentemente los elementos fibrosos se emplean cuando el receptor de la radiación tiene una abertura de entrada de 90°, por ejemplo, en un registro fotográfico de contacto de la imagen desde la cara de salida de la pieza fibrosa en los objetivos, en los cuales la curvatura del campo se corrige con ayuda de un haz de guías de luz. Las condiciones del empleo de una placa en calidad de ventana de entrada de un conversor electronoóptico son las mismas: a la entrada incide la radiación que viene del objetivo con una abertura u_1 considerablemente menor de 90°, y la radiación se percibe en el fotocátodo, el cual se encuentra en contacto con la cara de salida de la pieza. Como se ve en la fórmula (33), en este caso es indispensable emplear una pieza fibrosa con una abertura numérica nominal igual o mayor que 1.

Una condición de funcionamiento de una pieza fibrosa en dispositivos, ampliamente divulgada, es cuando en la entrada de la pieza cae una radiación difusa, y a la salida es captada por un receptor de difusión. Por ejemplo, en los tubos de haces electrónicos y en los conversores electronoópticos, en la cara de entrada de la pieza se encuentra un luminóforo (radiador de difusión)

y en la cara de salida, un fotocátodo o una película fotográfica (receptor de difusión).

El efecto de los tres anillos para estos casos constituye un principio muy interesante de aplicación de los elementos fibrosos que en un comienzo fue algo inesperado para los constructores de aparatos. En la fig. 29, *b* se muestra un caso de irradiación difusa de la cara de entrada (el receptor de difusión *6* se encuentra en contacto *óptico* con la cara de salida de la pieza). La componente $\Phi = {}^{c}_{u2}$, cuando hay un contacto óptico del receptor, no puede reflejarse en la cara de salida. En tal caso, si se emplea una pieza fibrosa, por ejemplo, con una abertura numérica $A_0 = 0{,}866$ (una clara violación del principio de concordancia de las aberturas), el coeficiente de transmisión del contraste por medio de un haz de guías de luz será

$$K_2 = \frac{\Phi_n}{\Phi_n + \Phi_u^u + \Phi_{u1}^c + \Phi_{u2}^c + \Phi_b^c + \Phi_b^u} = 0{,}300;$$

si se cumple la condición de concordancia de las aberturas y se emplea una pieza fibrosa con $A_0 \geqslant \geqslant 1$, entonces

$$K_2 = \frac{\Phi_n}{\Phi_n + \Phi_u^u + \Phi_{u2}^c} = 0{,}400.$$

Si, en cambio, el receptor de radiación *6* se encuentra en la cara de salida de la pieza, pero no está en contacto óptico, sino *cuasióptico*, por ejemplo, con un juego de dos a cuatro longitudes de onda de la radiación (fig. 29, *c*), entonces esto garantiza la reflexión de la componente Φ_{u2}^c, y el coeficiente de transmisión del contraste cuando $A_0 = 0{,}866$ es

$$K_2 = \frac{\Phi_n}{\Phi_n + \Phi_u^u + \Phi_{u1}^c + \Phi_b^c + \Phi_b^u} = 0{,}370,$$

y para $A_0 > 1$

$$K_2 = \frac{\Phi_n}{\Phi_n + \Phi_u^u} = 0{,}530. \qquad (34)$$

De esta manera, en un contacto cuasióptico del receptor de difusión con la cara de salida de un haz de guías de luz, tiene lugar un aumento considerable del contraste de la imagen.

Este principio de empleo de elementos fibrosos en la construcción de aparatos para el aumento del contraste de la imagen, como han demostrado las investigaciones de científicos soviéticos, no conduce a una disminución de los demás parámetros ópticos del sistema, en particular, el difuminado de los contornos de la imagen, predicho por la teoría para un juego de 1 a 2μ entre la pieza fibrosa y el material fotográfico a frecuencias bajas y medias de la mira no se nota en absoluto. Esta falta de nitidez influye un poco en la disminución de la resolución solamente en aquellos sistemas, en los cuales se requieren una resolución y calidad muy altas de la imagen.

En las expresiones (33) y (34) se puede ver que los elementos fibrosos con una abertura numérica $A_0 > 1$ son los que ofrecen mayores perspectivas, ya que mediante su utilización en régimen de contacto cuasióptico del receptor, en la disminución del contraste de la imagen actúa tan sólo la componente Φ_u^u y en el régimen de contacto óptico, únicamente los flujos Φ_u^u y Φ_{u2}^c.

Métodos para aumentar el coeficiente de transmisión del contraste de un haz de guías de luz. Del efecto de los tres anillos se desprende una serie de recomendaciones precisas y fundamentadas en cuanto a los métodos para aumentar el coeficiente de transmisión del contraste de los elementos fibrosos. De lo expuesto anteriormente se deduce que el contraste de la imagen disminuye

debido a la acción de las componentes no operativas del flujo e incluso para $A_0 \geqslant 1$ y en ausencia de un contacto óptico del receptor con la cara de salida de la pieza, de todas maneras, los rayos parásitos de la componente Φ_u^u son percibidos por el receptor junto con los rayos útiles Φ_n y disminuyen el contraste. De aquí se saca la conclusión de la necesidad de disminuir las magnitudes de las componentes no operativas del flujo que se propaga. Los métodos para aumentar el coeficiente de transmisión del contraste de los elementos fibrosos que se conocen hoy día están dirigidos precisamente a la solución de este problema. Veamos cuáles son estos métodos.

Concordancia de las aberturas de los elementos del sistema. Este principio incondicional, que resulta del efecto de los tres anillos, ha sido analizado detalladamente con anterioridad. Recordemos que en este caso en el iris del receptor caen solamente los rayos Φ_u^u, la componente Φ_u^c no incide en el iris y las componentes Φ_b^c y Φ_b^u están ausentes. En una radiación y captación difusas se deben emplear necesariamente piezas fibrosas con $A_0 \geqslant 1$. Sin embargo, incluso cumpliendo con este principio, el flujo Φ_u^u hace disminuir el contraste de la imagen.

Coeficiente de relleno de la cara, con los filamentos guías de luz. El coeficiente τ_5 determina la magnitud del flujo Φ_u^u. Como puede verse en las expresiones (31), cuanto mayor sea el relleno τ_5, tanto menor será Φ_u^u. Por lo tanto, es necesario utilizar elementos fibrosos con el más alto relleno permisible de la cara de la pieza, con los filamentos. El relleno τ_5 depende del espesor del intercalado luminoaislante. Las investigaciones de los últimos años han demostrado que para el aislamiento luminoso efectivo de las fibras en la región visible del espectro es sufi-

ciente un espesor del intercalado entre 0,7 y 1,0μ, que es el espesor mínimo admisible para la región visible del espectro de radiación.

Además, el relleno depende del carácter del empaquetamiento de las fibras; así, para un diámetro de los filamentos de 5μ y un espesor (en el sitio más delgado) del intercalado de 1μ en un empaquetamiento cuadrado (véase la fig. 18, *a*) de los filamentos, $\tau_5 = 0{,}545$, y en un empaquetamiento hexagonal (fig. 18, *b*), el relleno se eleva hasta 0,627. Sin embargo, desde el punto de vista del relleno, éste no es el límite: con una disposición hexaédrica de las fibras (fig. 18, *c*) aumenta hasta 0,700. De esta manera, para disminuir el flujo Φ_u^u es necesario emplear piezas fibrosas con un corte hexaédrico tanto de las fibras como de las envolturas.

Envoltura del aislador de luz semitransparente. Incluso en el caso de máximo relleno de la cara, con los filamentos $\tau_5 < 1$, es decir, $\Phi_u^u > 0$, los rayos Φ_u^u pasan a través de un haz de guías de luz y disminuyen (aunque en menor grado) el contraste de la imagen. El efecto de los tres anillos sugiere el método para una posterior reducción de Φ_u^u: el debilitamiento de los rayos cuando se propagan a a través de una pieza utilizando envolturas semitransparentes (es decir, aisladoras de luz). En este caso los revestimientos realizan dos funciones: el aislamiento luminoso de los filamentos y la absorción de luz de los rayos Φ_u^u.

La efectividad de las envolturas semitransparentes ha sido confirmada en numerosos experimentos. Así, en un par de vidrios БФ25-К17 (BF25-K17) ($A_0 = 0{,}54$) para una frecuencia de las rayas de 40 lín/mm (en una radiación y recepción difusas) $K = 0{,}10 \div 0{,}15$; mientras que el empleo de una envoltura semitransparente de vidrio NS12 en lugar de la transparente K17

(A_0 queda igual) bajo idénticas condiciones aumenta el K hasta 0,40—0,50.

Actualmente la envoltura semitransparente se utiliza ampliamente como método básico para aumentar el coeficiente de transmisión del contraste. Tiene tan sólo un inconveniente: el empleo de esta envoltura disminuye un poco (generalmente dentro de los límites permitidos) la transmisión de luz del flujo útil debido a las pérdidas en las reflexiones internas.

Desde este punto de vista es efectivo el empleo de *vidrios fotocrómicos* que se oscurecen por la acción de la radiación y que por lo tanto desempeñan el papel de una envoltura semitransparente; el grado de su oscurecimiento es tanto mayor cuanto más fuerte sea el flujo. Las envolturas fotocrómicas son interesantes además porque su oscurecimiento más fuerte ocurre en la cara de entrada; el grado de oscurecimiento disminuye en la dirección hacia la cara de salida, con lo cual se logra un menor debilitamiento del flujo útil que en el caso de las envolturas semitransparentes.

Segunda envoltura no transparente. Con el objeto de disminuir las pérdidas ocasionadas por las reflexiones internas se ha utilizado una construcción de guías de luz monofilares, constituidos por un filamento con dos envolturas, de las cuales la primera es especialmente transparente y aisladora de luz, la segunda es oscura y de un vidrio altamente absorbedora de luz o de metal. Se supone que la primera envoltura transparente garantiza una alta transmisión de luz del flujo útil $\Phi_{u.}$, y la segunda absorberá las componentes parásitas del flujo. Desde el punto de vista del coeficiente de transmisión del contraste, la efectividad de las guías de luz con dos envolturas ha sido confirmada experimentalmente. Sin embargo, el haz de semejantes guías de luz y la

tecnología de su fabricación tienen una serie de inconvenientes.

1. Surge la necesidad de elaborar tres vidrios que satisfagan las exigencias de una compatibilidad tecnológica; uno de los vidrios debe contener un alto porcentaje de colorantes.

2. La tecnología de la manufactura de las guías de luz con dos envolturas se distingue por su complejidad y por el aumento del número de los parámetros que determinan la calidad de las fibras.

3. El uso de fibras con doble envoltura duplica el número de fronteras con discontinuidades del índice de refracción, lo cual, como lo demuestran los experimentos, reduce la calidad de la imagen transformada.

4. Si en las fibras con envoltura doble, el espesor de la capa transparente es tal que la onda, cuando hay reflexión interna total, llega solamente hasta la primera envoltura transparente, el coeficiente de relleno de la pieza fibrosa y, por lo tanto, la densidad de la información transmitida y la transmisión de luz son más bajas que en las piezas con un espesor óptimo de la envoltura; si, en cambio, el espesor total de las envolturas es tal que la radiación en la reflexión interna total llega hasta la segunda envoltura no transparente, entonces lo más sencillo y efectivo es utilizar guías de luz con una sola envoltura semitransparente, que sirve al mismo tiempo tanto de aisladora de luz como de atenuadora de luz y que tiene una absorción igual a la absorción efectiva de las dos envolturas.

5. Se demuestra experimentalmente que la variación de la transmisión de luz (ruido estructural) en la exploración por medio de una mancha pequeña (la condición de los tubos de haces electrónicos) en las piezas de fibras con envoltura doble, es mayor que cuando se emplean guías de luz de una sola envoltura.

Debido a estas causas, dicho método para aumentar el coeficiente de transmisión de contraste no ha encontrado un amplio uso.

Pantallas en las caras de entrada de las envolturas aisladoras de luz. Una atenuación más efectiva no sólo del flujo Φ_u^u, sino también de los rayos Φ_u^c, se logra colocando en las caras de entrada de las envolturas pantallas no transparentes que absorban o reflejen la radiación que sobre éstas incide. En este caso, dependiendo de la transparencia de las pantallas, se puede eliminar completamente el flujo Φ_u. Sin embargo, el nivel actual de la tecnología de construcción de estas capas apantalladoras solamente en las caras de las envolturas, no permite por ahora emplear este método para una utilización amplia.

Filamento semitransparente. Como se ve por lo expuesto anteriormente, las componentes no operativas cuando se propagan a través de una pieza fibrosa atraviesan tanto los filamentos como las envolturas. Puesto que generalmente el diámetro de los filamentos es mayor que el espesor del revestimiento (por lo menos en 3 a 5 veces), entonces la longitud total del recorrido de los rayos a través de los filamentos es mayor que a través de las envolturas. Por esto, en aquellos sistemas, en los cuales se requiere un contraste especialmente alto y es admisible una disminución de la transmisión de luz del flujo útil, se utiliza un filamento semitransparente (es decir, absorbedor de luz). Los experimentos han demostrado que en este caso el aumento del coeficiente de transmisión del contraste es considerablemente mayor que al utilizar una envoltura semitransparente.

Irradiación dura de una pieza fibrosa. Se sabe que bajo la acción de una irradiación dura (por ejemplo, con rayos X o rayos gamma), el vidrio óptico se oscurece y disminuye así la transmisión

de luz. Este fenómeno aplicado a un haz de guías sometido a una irradiación dura conduce a una disminución de la transparencia del filamento y de la envoltura; con otras palabras, aumenta el contraste de la imagen. Este método es especialmente efectivo en aquellos sistemas en los cuales la pieza fibrosa funciona en condiciones de una irradiacion dura y tiene una reserva suficiente de transmisión de luz.

Combinaciones de los diferentes métodos. En cualesquiera condiciones de funcionamiento de una pieza fibrosa, el flujo Φ_u^u es captado por el receptor y disminuye el contraste do la imagen, es decir, incluso para frecuencias muy bajas de las rayas es imposible (a diferencia de los elementos de la óptica clásica) obtener un K igual a 1, a menos que se utilicen métodos especiales para aumentarlo. Además, debido a diferentes causas, que se exponen en el capítulo siguiente, el coeficiente de transmisión del contraste de un haz de guías de luz disminuye al aumentar la frecuencia de las rayas. En cambio, el empleo de uno de los métodos analizados permite elevar el coeficiente de transmisión del contraste do un haz de guías de luz en todas las frecuencais de las rayas, y en las frecuencias bajas éste se acerca a 1.

Un aumento más del contraste en las frecuencias media y alta de las rayas es posible combinando los métodos antes expuestos. Así, la combinación de las envolturas fotocrómicas y de los filamentos semitransparentes aumenta considerablemente el coeficiente de transmisión del contraste de los elementos fibrosos (en comparación con el caso en que se emplea tan sólo uno de estos métodos) y a la vez rebaja el grado de disminución de la transmisión de luz del flujo útil comparado con el caso en que se utilizan envolturas semitransparentes. La posibilidad de

utilizar una de las combinaciones de estos métodos se determina generalmente al diseñar una pieza fibrosa para un fin concreto.

Coeficiente de transmisión del contraste de manojos flexibles regulares de fibras. Al utilizar en aparatos los manojos flexibles regulares de fibras, con longitudes desde 0,5 hasta 4 m y a veces mayores, los métodos para aumentar el coeficiente de transmisión del contraste con ayuda de envolturas semitransparentes y fotocrómicas, de irradiación dura y de filamentos semitransparentes no son admisíbbles, ya que debido a la gran longitud de las fibras, la transmisión de luz de un manojo disminuye fuertemente. Al mismo tiempo, las componentes no operativas del flujo llegan perfectamente hasta la cara de salida y disminuyen el contraste de la imagen. En la parte flexible del manojo, la que generalmente constituye hasta el 90—99% de la longitud total, las fibras no están ligadas entre sí y en algunos lugares, separadas por el vidrio de la envoltura, mientras que en otros estas útilmas están separadas por capas de aire. En tal situación es bastante efectivo el método de relleno del espacio interfibroso con un medio absorbedor de luz, por ejemplo una suspensión fina y dispersa de grafito. Esta última no influye en absoluto en la transmisión de luz del flujo útil, pero sí atenúa en sumo grado (prácticamente en su totalidad) los rayos no operativos; además, semejante medio sirve de lubricante para reducir la fricción interfibrosa.

Método para el control e investigación de los elementos fibrosos. El efecto de los tres anillos es la propiedad fundamental y más característica de un haz de guías de luz. Tal efecto tiene lugar en aquellos tipos de artículos fibrosos como los focones, anamórfotes, elementos rotores, diferentes conversores, manojos flexibles y rígidos

de fibras, etc. El efecto de los tres anillos se tiene en cuenta al plantear los requisitos técnicos que deben reunir los elementos fibro-ópticos destinados a fines concretos y se utiliza como un método objetivo de control y de investigación de los elementos fibrosos de diferente construcción.

Citemos solamente algunos principios fundamentales de control y de investigación de los artículos fibrosos con ayuda del efecto de los tres anillos, los cuales ya han sido comprobados o elaborados.

1°. El método del rayo límite de reflexión total interna, consistente en su observación y medición de la intensidad de la luz, se utiliza para determinar la calidad de la frontera filamento—envoltura, para la elección del espesor óptimo de la envoltura en dependencia de las exigencias concretas al artículo fibroso, para la investigación de la mutua difusión de los vidrios del filamento y de la envoltura, para definir la presencia de microdefectos en la frontera filamento—envoltura y su influencia en la calidad del artículo, al elaborar los regímenes termomecánicos del proceso tecnológico, etc.

En la práctica se ha observado que las piezas fibrosas reales de ciertos pares de vidrios poseen una abertura menor que la calculada. Esto es debido tanto a la difusión mutua de los vidrios de los filamentos y de las envolturas, la cual disminuye la diferencia de sus índices de refracción, como también al espesor insuficiente del intercalado entre los filamentos. El ángulo bajo el cual se observa un borde luminoso, permite encontrar la abertura numérica real de la pieza. En el monocromador УM-2 (UM-2) se miden los ángulos de aparición del rayo límite de reflexión total interna para diferentes longitudes de onda de la radiación, con lo cual se determina la abertura propia de las guías de luz y su

dependencia de la longitud de onda. Por medio de este método ha sido medida la dependencia de la abertura numérica nominal de las guías de luz hechas de vidrio БФ25-К17 (BF25-K17) de la longitud de onda de la radiación representada en la figura 10.

2. La observación y medición de la intensidad de la luz del anillo interno (la componente $\Phi_{б}^{и}$) permiten hallar el espesor óptimo del intercalado aislador de luz entre los filamentos, lo mismo que el estado de la frontera filamento—envoltura.

3. La observación y medición de la intensidad de la luz de los tres anillos para un ángulo de inclinación del haz dirigido de rayos a la entrada mayor que el ángulo de abertura, dan la posibilidad de valorar la efectividad de la utilización del material dado en calidad de envoltura absorbedora de luz de los filamentos.

4. Los tres anillos permiten medir la perpendicularidad de las guías de luz elementales respecto al plano operacional (la cara) de la pieza fibrosa.

5. Con ayuda de los indicadores de la distribución luminosa a la salida, cuando en la cara de entrada de una pieza fibrosa incide el haz cónico de rayos, se puede determinar el grado de defectos total de un elemento fibroso, que es consecuencia de los diferentes microdefectos y depende del grado de difusión mutua de los materiales del filamento y de la envoltura.

6. La observación y medición de la intensidad de la luz de los anillos interno o externo garantiza la medición de la abertura numérica real de una pieza fibrosa, que frecuentemente se diferencia de la calculada.

7. Por medio de medición de la intensidad de la luz en los anillos interno o externo se puede encontrar el coeficiente de relleno de la cara de una pieza con los filamentos.

8. El control de una pieza fibrosa a base de los tres anillos permite crear los regímenes termomecánicos óptimos de fabricación de los elementos fibrosos y plantear las exigencias fundamentales a las propiedades físico-químicas de las materias primas, por ejemplo, de los vidrios.

9. La medición de la intensidad de la luz de los tres anillos por separado, ofrece la posibilidad de determinar la transmisión de luz real del flujo útil (informativo) Φ_n y de las componentes no operativas $\Phi_u^u + \Phi_b^c$, Φ_u^c y Φ_b^u.

TRANSFERENCIA DE IMÁGENES POR MEDIO DE UN HAZ DE GUÍAS DE LUZ

3

Las leyes de la transferencia de una imagen óptica por medio de un haz de guías de luz y correspondientemente sus características ópticas, a excepción del efecto de los tres anillos, se determinan además por una serie de diversos factores: el carácter de mosaico de la estructura de la pieza fibrosa y el principio de la transmisión de la imagen por elementos, las pérdidas de la información transmitida, las limitaciones del poder resolutivo del haz de guías de luz realizable en un aparato dado, la imposibilidad de la formación independiente de la imagen y otros.

6. FORMACION DE LA IMAGEN POR MEDIO DE UN HAZ DE GUIAS DE LUZ

Las piezas fibrosas transfieren la imagen que ha sido formada por métodos de contacto o de proyección sobre su cara de entrada, a la superficie de la de salida (fig. 30). Si se aleja el objeto (la imagen) a unas cuantas decenas de micras de la cara de entrada, la transmisión de la imagen es posible, pero por lo general con pérdida de resolución y contraste de la misma. La imagen transferida análogamente al extremo de salida por un haz de guías de luz no puede formarse en un plano considerablemente alejado de dicho extremo. La «formación» de una imagen por un elemento fibroso sobre un plano no coincidente con su cara de salida, es posible siempre y cuando la distancia hasta el plano no pase de unas cuantas decenas de micras. Generalmente, a partir de unas dos o tres micras, el poder resolutivo y el contraste de la imagen comienzan a disminuir bruscamente a medida que se aumenta la distancia. Estrictamente, hablando, el concepto de

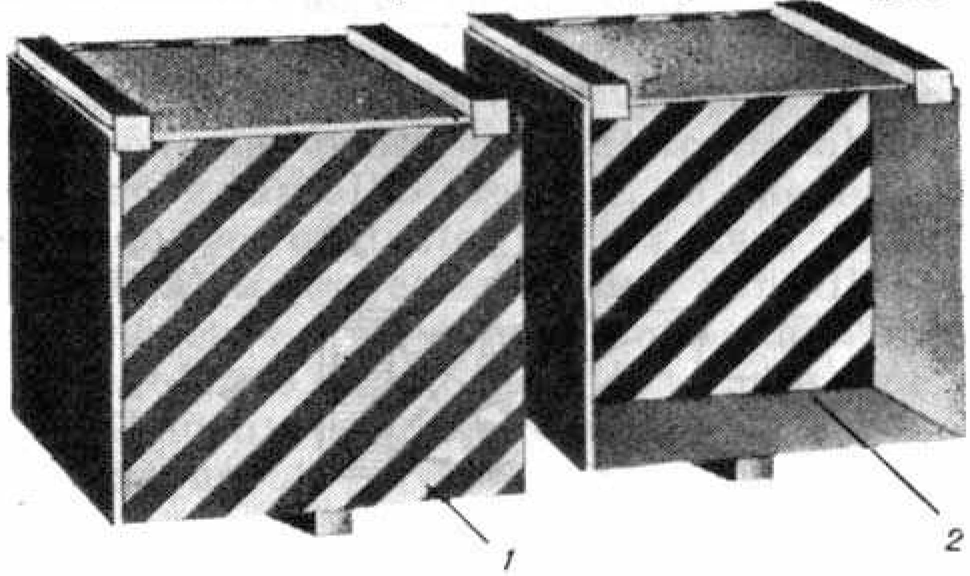
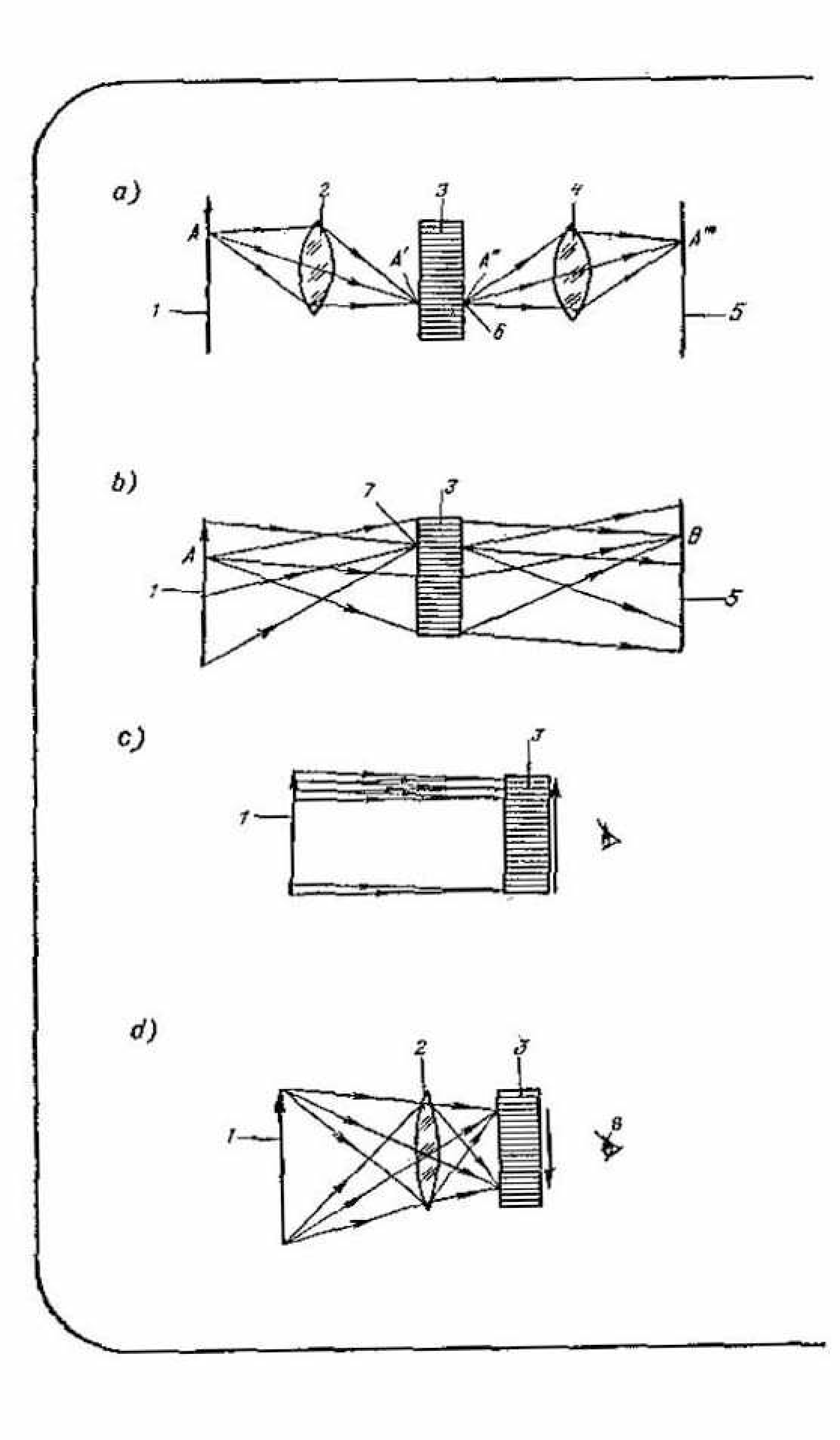


FIG. 30. Transmisión de la imagen por un haz de guías de luz (*1*) y por un bloque monolítico de vidrio (*2*)



a)
2
3
4
A
A'
A''
A'''
1
5
6
b)
7
3
A
8
1
5
c)
3
1
d)
2
3
1
8

«formación» de la imagen no es aplicable a un haz de guías de luz, a diferencia de los elementos de la óptica clásica.

Lo dicho se explica en la figura 31. Al transmitir una imagen con ayuda de la óptica clásica, por ejemplo por medio de un objetivo, el amplio haz de rayos (fig. 31, *a*) que parten del elemento *A* del objeto es recogido por el objetivo en una mancha *A'*, que es la imagen del elemento *A* y cubre uno o varios filamentos. La imagen *A"* transmitida al extremo de salida del haz de guías de luz, es la del elemento *A* y satisface en cierto grado el principio de semejanza de la imagen al objeto. Pero si se quita el objetivo, entonces en la cara de entrada (fig. 31, *b*), por ejemplo del filamento *7*, caen rayos de todos los elementos del objeto, mientras que, por otra parte, desde el elemento *A* del objeto parten rayos que alcanzan todos los filamentos de la cara de entrada de la pieza fibrosa; es decir, en este caso la información es transmitida y la cara de salida se encuentra más o menos uniformemente iluminada, pero no se puede hablar de ninguna semejanza de la imagen con el objeto.

La imagen que se transmite a la cara de salida del haz de guías de luz según el esquema de la figura 31, *a*, se puede observar con el ojo (que es un sistema óptico compuesto de objetivo — cristalino y pantalla— retina), se puede registrar (poniendo en contacto con la cara una placa fotográfica) o proyectar en una pantalla —plano de la imagen— con ayuda de un segundo objetivo. En este último caso, todos los rayos que salen de un filamento, por ejemplo del *6*, se reúnen en una mancha *A'''*, que es la imagen del ele-

←——

FIG. 31. Transmisión de la imagen por un haz de guías de luz:
1—objeto; *2*, *4*—objetivos; *3*—haz de guías de luz; *5*—plano imagen; *6*, *7*—filamentos individuales; *8*—ojo

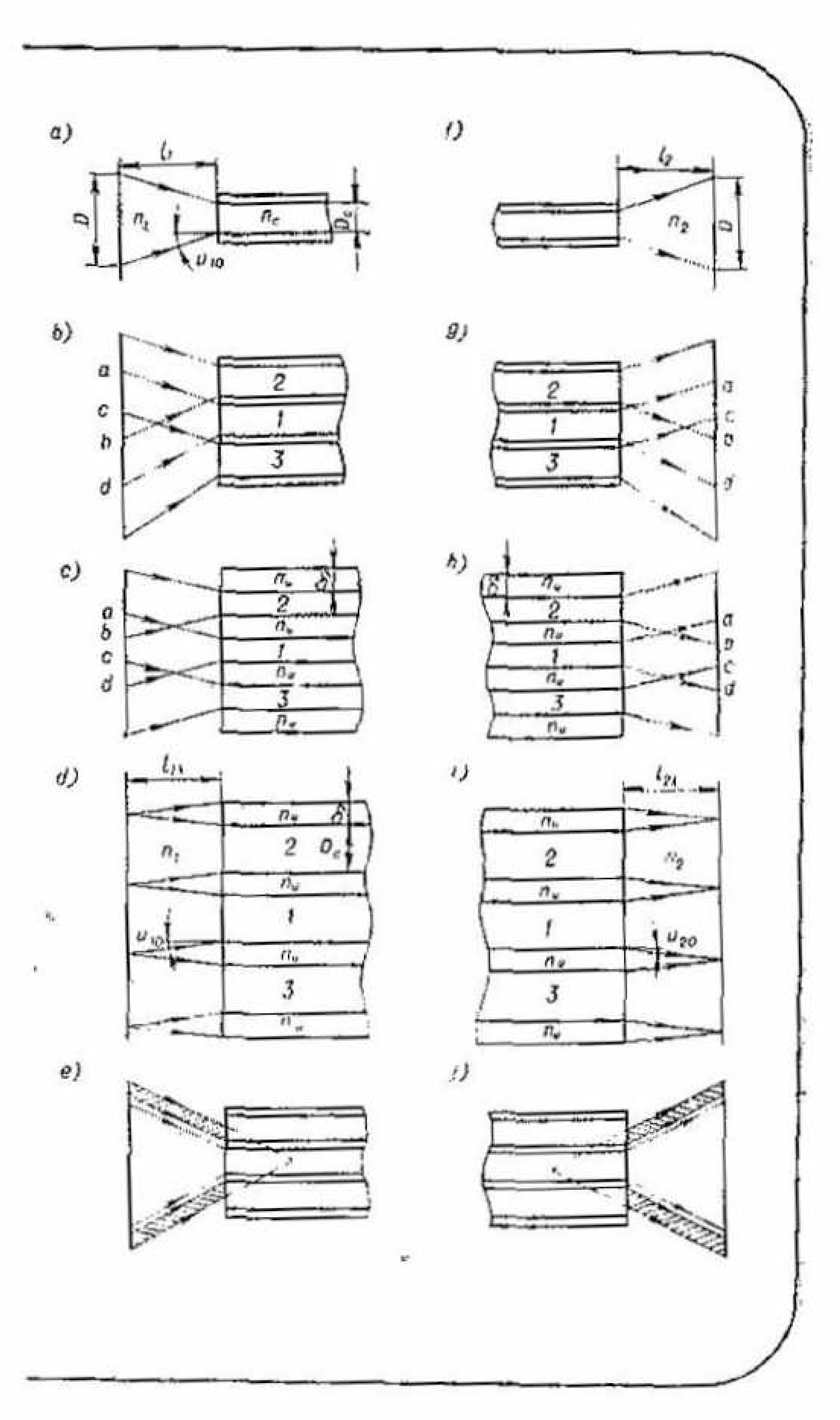
mento A. En todos los tres casos anteriores, la imagen sobre la pantalla es semejante en grado suficiente al objeto original.

El flujo de la imagen transferida a la cara de salida de un haz de guías de luz tiene una estructura geométrica compleja, y sale cubriendo todas las direcciones en un cono determinado. En suma, al punto B de la pantalla (fig. 31, b) llegan rayos de todos los filamentos, mientras que de un filamento determinado salen rayos hacia todos los puntos de la pantalla, o sea que a la pantalla llega información, pero con pérdida completa de la estructura original, y no se puede hablar de semejanza alguna con el objeto, ya que la pantalla queda más o menos uniformemente iluminada.

Desenfoque exterior del plano de la imagen. En muchos aparatos, ya sea por limitaciones de construcción o por las condiciones correspondientes de aplicación (por ejemplo a causa de limitación del espacio), a menudo no es posible utilizar un sistema de lentes a la entrada del haz de guías de luz para proyectar la imagen del objeto a la cara de entrada. En consecuencia, entre el objeto cuya imagen se requiere transmitir y la cara de entrada de la pieza fibrosa se crea un cierto *juego*, es decir, tiene lugar un desenfoque exterior del plano de la imagen con relación al extremo de los filamentos. En tal caso, cada filamento recibe luz desde una superficie mayor que la del tope de uno solo de los conductos de luz (fig. 32, a). El diámetro D del elemento de la imagen desde el cual inciden los rayos sobre un filamento dado de dimámetro D_c, depende de la abertura numérica A_0 de las guías de luz, de la distancia l_1 desde el tope hasta el objeto y del

→

FIG. 32. Desenfoque del plano imagen con respecto a las caras de un haz de guías de luz



a)
b)
c)
d)
e)
g)
h)
2
1
3
a
b
c
d

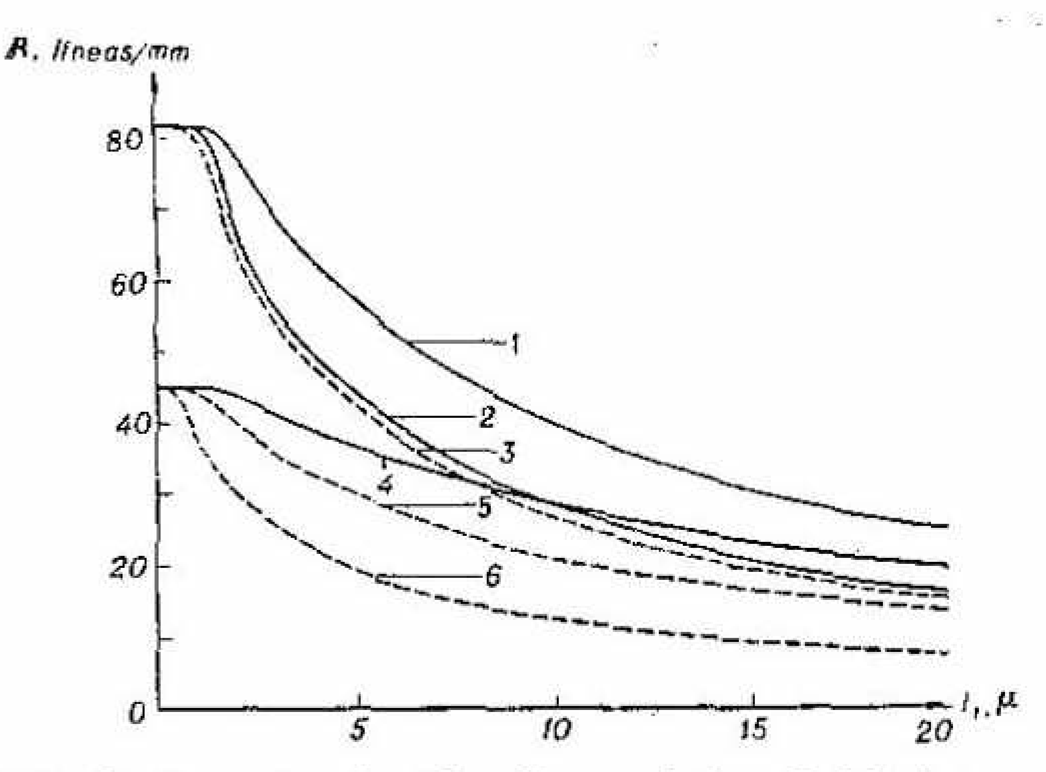


FIG. 33. Dependencia del poder resolutivo R del sistema holgura — haz de guías de luz de la magnitud l_1 de la holgura

índice de refracción n_1 del medio que llena el juego. El diámetro D, como se ve en la construcción de la figura 32, *a*, será

$$D = D_c + \frac{2A_0 l_1}{\sqrt{n_1^2 - A_0^2}}.$$

En este caso, el poder resolutivo R del sistema juego—haz de guías de luz se determina por la expresión

$$R_j = \frac{1}{2D} = \frac{\sqrt{n_1^2 - A_0^2}}{2(D_c\sqrt{n_1^2 - A_0^2} + 2l_1A_0} < \frac{1}{2D_f} = R. \tag{35}$$

En la figura 33 se muestra la dependencia del poder resolutivo del sistema juego—haz de guías de luz de la magnitud del juego, calculada según la fórmula (35) para un haz de guías de luz con filamentos de diámetro de 5 (curvas *1*,

2 y *3*) y 10 μ (curvas *4*, *5* y *6*), siendo el grosor de las capas intermedias de 1 μ, con aberturas numéricas de 0,54 (línea continua) y de 0,85 (línea punteada), e índices de refracción del medio del juego de 1,0 (curvas *2* y *6*) y 1,5 (curvas *1*, *3*, *4* y *5*).

Consideremos un haz de guías de luz, en el cual la cara de entrada de las envolturas aisladoras de luz tienen un recubrimiento absorbente de la luz, es decir, en el que el flujo Φ_u ha sido eliminado. Cuando existe juego, una parte de los rayos del elemento *D* del objeto inciden no solamente en el filamento *1* sino también en sus vecinos *2* y *3*; así, en las condiciones de la figura 32, *b*, al filamento vecino *2* llegan rayos del segmento *ab*, y al filamento *3* desde el *cd*; si se disminuye el juego l_1 o se aumenta el espesor de las envolturas aislantes, decrece el flujo que va del elemento dado *D* a los filamentos vecinos; por ejemplo, en la figura 32, *c* el área de los segmentos *ab* y *cd* ha disminuido.

De esta manera, el juego implica una disminución del coeficiente de transmisión de contraste del sistema juego — haz de guías de luz, disminución qué es especialmente fuerte en las frecuencias altas de las rayas. Dependiendo de la distancia l_1, de la abertura numérica de las guías de luz, del diámetro de los filamentos y del espesor δ de las envolturas, el contraste de la imagen para altas frecuencias de rayas puede disminuir hasta un nivel inferior al de la sensibilidad de contraste del analizador (receptor) de la imagen; por lo mismo, se reduce también la frecuencia de las rayas que permite el sistema juego — haz de guías de luz. Solamente en el caso (fig. 32, *d*) de que el juego l_1 satisfaga la condición.

$$l_{1k} \leqslant \frac{\delta}{2A_0} \sqrt{n_1^2 - A_0^2} \qquad (36)$$

y de que la cara de entrada de las envolturas haya sido recubierta con un material absorbente de la luz, la radiación de un elemento dado del objeto incide sobre un solo filamento, es decir, no tiene lugar la disminución ni del poder resolutivo, ni del coeficiente de transmisión de contraste del sistema juego-haz de guías de luz. En este caso, el poder resolutivo se determina por la expresión

$$R=\frac{1}{2D_f}, \qquad (37)$$

en donde D_f es el diámetro de una fibra elemental junto con su envoltura o, dicho de otra manera, el paso de la estructura fibrosa (la distancia entre los centros de filamentos contiguos) *sobre la cara receptora de entrada* de la pieza. Sin embargo, la distancia l_{1k} es muy pequeña. Así, para un espesor de la envoltura de 1 μ y un índice de refracción del medio del juego de $n_1 = 1,5$, con $A_0 = 0,5$ tenemos $l_{1k} = 1,42$ μ, mientras que con $A_0 = 0,8$ l_{1k} disminuye hasta 0,8 μ; si en ambos casos el juego está lleno de aire, entonces la disminución será respectivamente hasta 0,87 y 0,38 μ. Un aumento del espesor de la envoltura hasta 2 μ duplica los valores permisibles señalados de l_{1k} en los cuatro casos.

Como se ve en la figura 33 y la fórmula (35), el poder resolutivo del sistema juego — haz de guías de luz crece con el aumento del índice de refracción n_1 del medio del juego, y con la disminución de la distancia l_1, del diámetro de los filamentos y de la abertura numérica A_0 de las guías de luz. Esto último se explica en razón de que al reducir el A_0 de un filamento dado son atrapados rayos de un área menor del objeto. Sin embargo, cuando esto sucede, como lo demuestra el efecto de los tres anillos, aumenta la parte de las componentes parásitas del flujo; si no se toman medidas para debilitarlas, se reduce brus-

camente el coeficiente de transmisión de contraste de la pieza fibrosa y, en suma, disminuye el poder resolutivo.

Si en el juego hay aire ($n_1 = 1$), entonces el poder resolutivo y el contraste se reducen notablemente. Demostremos esto con un ejemplo. Supongamos que el medio del juego tiene índice de refracción $n_1 = 1{,}5$, la abertura numérica de las guías de luz $A_0 = 0{,}54$, el juego $l_1 = 15\ \mu$ y el diámetro de los filamentos $D_c = 5\ \mu$; en este caso, el diámetro D del elemento del objeto sometido a resolución es de $16{,}6\ \mu$, es decir, en primera aproximación, el poder resolutivo del sistema juego — haz de guías de luz es menor que la tercera parte de la resolución de la pieza fibrosa. Si en condiciones similares en el juego hay aire ($n_1 = 1$), entonces $D = 24{,}2\ \mu$, o sea, la resolución es cinco veces menor.

Desenfoque exterior a la salida. Si el receptor de información (por ejemplo, un ocular) a la salida del haz de guías de luz está enfocado no a la cara de los filamentos, sino a un plano alejado de la cara de salida a una distancia l_2 (por la ley de la inversión del paso de los rayos, la construcción de la imagen es análoga al caso precedente); entonces, como se ve en las figuras 32, *f*, *g* y *h*, el elemento de la imagen transmitido por un filamento dado al plano l_2 resulta como si hubiera aumentado y su luminosidad en comparación con el brillo del extremo se altera al recibir rayos de los filamentos vecinos, es decir, se reduce el contraste de la imagen. De la misma manera que en el caso de desenfoque a la entrada, la disminución de contraste en las altas frecuencias cuando la magnitud del juego es considerable, conduce a la reducción del poder resolutivo del sistema haz de guías de luz-juego.

Como se ve en las figuras 32 *f*, *g* y *h*, la dependencia del poder resolutivo y del coeficiente de

transmisión de contraste del sistema haz de guías de luz — juego de los parámetros D_c, l, A_0 y n_2 es análoga al caso precedente. El único caso en que no tiene lugar una disminución del poder resolutivo y del contraste de la imagen es cuando

$$l_{2h} \leqslant \frac{\delta}{2A_0} \sqrt{n_1^2 - A_0^2}$$

Sin embargo, como en el caso anterior, este juego permisible es sólo del orden de 1 a 2 micras. En los dos casos de desenfoque exterior (a la entrada y a la salida), con el aumento del juego empiezan a influir sobre el contraste de la imagen de un elemento dado no solamente los filamentos vecinos, sino también otros más alejados.

Desenfoque interior del plano de la imagen. Cuando hay desenfoque exterior, el máximo poder resolutivo y el mayor coeficiente de transmisión de contraste en un haz de guías de luz se alcanzan cuando la imagen se proyecta exactamente a la cara de entrada y se percibe directamente desde el plano de la cara de salida. De aquí las altas exigencias que se le hacen al reglaje de los sistemas ópticos que constan del objetivo, haz de guías de luz y ocular. Si el plano de proyección o el de recepción están enfocados hacia el interior del haz de guías de luz (desenfoque interior), ello conduce a la reducción del contraste de la imagen, y cuando el desenfoque es considerable, a la disminución de la frecuencia resolutiva de las rayas.

Lo dicho se explica en la figura 32, *e*, en donde para claridad se han representado sólo los rayos que limitan los haces cónicos. Si el plano de proyección de la imagen se encuentra dentro del haz de guías de luz, entonces una parte de los rayos (la zona sombreada de la figura 32, *e*) del elemento dado incide en los filamentos vecinos, con lo cual se reduce el contraste de las imá-

genes proyectada y transmitida. Cuando el desenfoque es considerable, el contraste en las frecuencias altas de las rayas se rebaja tanto que disminuye incluso la resolución.

Análogamente, si el dispositivo receptor está enfocado hacia el interior de la pieza fibrosa, junto con los rayos que salen de un filamento dado se atrapan rayos desde los vecinos (zona sombreada en la figura 32, *j*), y todos juntos se reúnen en una sola mancha que es la imagen del elemento transmitido por el filamento dado. Al caer en esta mancha los rayos de los filamentos vecinos, el contraste de la imagen sobre la pantalla disminuye. Es natural que con el aumento del desenfoque, la reducción del contraste conduzca a la reducción de la frecuencia resolutiva.

Objetivo focónico. Desde los primeros tiempos de la fundación y desarrollo de la óptica de fibras, los especialistas han afirmado que, como se demuestra fácilmente en los experimentos, un haz de guías de luz no puede formar imagen a menos que se utilice algún sistema óptico u óptico-electrónico para hacerlo sobre la cara de entrada de los filamentos, y que el haz de guías de luz puede solamente transferir la imagen desde la cara de entrada hasta el plano de la de salida.

En principio, un haz de guías de luz puede «formar» la imagen de un objeto alejado sobre su propia cara de salida, como sucede en el caso (fig. 31, *c*) en que la apertura numérica es muy pequeña, aunque diferente de cero. Sin embargo, su luminosidad, o sea la magnitud del flujo que forma un elemento dado de la imagen, es extraordinariamente reducida, a tal grado que es muy difícil reconocer la imagen «formada» por el haz de guías de luz.

Para comparar con el caso anterior se muestra en la figura 31, *d* la formación de un elemento

de una imagen por medio de una lente; como se ve, al atrapar una cantidad incomparablemente mayor de rayos del elemento dado del objeto, el sistema de lentes garantiza la luminosidad necesaria de la imagen.

Este defecto del haz de guías de luz que forma la imagen se puede en parte eliminar al construir la pieza fibrosa, confeccionándola, por ejemplo, de guías de luz de neodimio, las cuales bajo la acción de un poderoso bombardeo exterior de radiación van a reforzar, a semejanza de los láseres el débil flujo informativo que le cae en su cara de entrada. No obstante, la complejidad de la construcción de semejante «objetivo», en comparación con la de los objetivos clásicos corrientes, suscita dudas acerca de su viabilidad.

Otro método de eliminación de la poca luminosidad del haz de guías de luz que «forma» la imagen consiste en concentrar en un área menor el flujo débil que ha caído a la cara de entrada y elevar de este modo la luminosidad de la imagen. En este principio se funda la acción del *objetivo focónico*, que es, en esencia, el único tipo de haz de guías de luz que puede formar por sí mismo, sin dispositivos suplementarios, una imagen de luminosidad aceptable sobre su cara de salida.

Los filamentos individuales del focón (fig. 34) que tienen una relación D_1/D_2 grande entre los diámetros de sus extremos, dejan pasar solamente los rayos que inciden en la cara ancha D_1 bajo ángulos no mayores de $u_1 = (D_2/D_1) + \beta$, donde β es el ángulo del vértice del filamento cónico (ángulo de conicidad). Por eso el focón *2*, constituido por filamentos guías de luz tales que sus ejes en la cara de entrada están separados por una distancia angular aproximada de $2u_1$, forma en la cara de salida *3* la imagen del cuadro del espacio circunvecino *1*. El poder resolutivo angular de semejante objetivo es igual a $2u_1$,

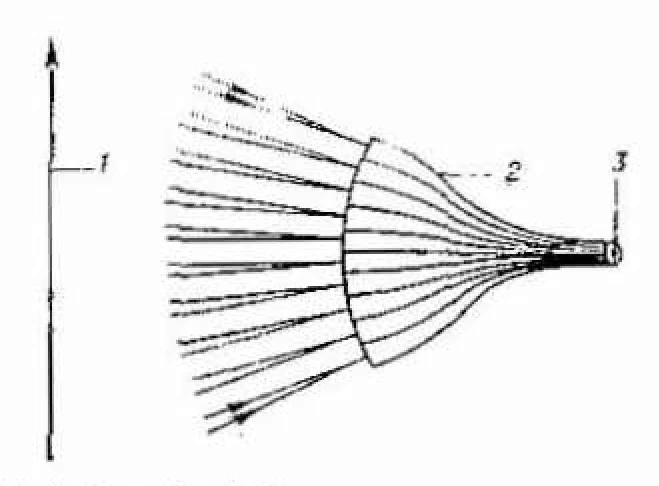


FIG. 34. Objetivo focónico

y el diámetro del filamento de cara de entrada $D_1 = D_2/(u_1 - \beta)$, donde D_2 es no sólo el diámetro de la cara de salida del filamento, sino también el del elemento de la imagen.

En principio, el objetivo focónico puede abarcar cualquier campo visual hasta un hemisferio completo, e incluso mayor, y poseer un poder resolutivo suficiente. Para cada elemento de la imagen existe en el objetivo focónico su propia pupila individual de entrada, motivo por el cual su tamaño es considerable. Tales objetivos son utilizables en los casos en que se requieren grandes campos visuales sin mayores exigencias acerca de la resolución, o cuando el objetivo tiene que distinguir señales de sólo unas pocas direcciones en el espacio.

7. TRANSFERENCIA DE UNA IMAGEN POR ELEMENTOS Y CARACTER DE MOSAICO DE LA ESTRUCTURA

Toda pieza fibrosa se elabora, con diferentes procedimientos tecnológicos, a partir de un manojo de filamentos guías de luz separados por envolturas aisladoras de luz. Como se vio en el

capítulo II, el flujo útil que incide en la cara de entrada de un filamento se propaga a través del mismo y sale por el extremo opuesto, repartiéndose por la superficie del último independientemente de la distribución de la luminosidad en la del primero, es decir, cada filamento individual transfiere solamente la información relativa a uno solo de los elementos de la imagen que ha sido proyectada sobre su cara de entrada.

Transferencia de una imagen por elementos. Una transferencia tal desde la cara de entrada hasta el de salida constituye una de las diferencias fundamentales de cualquier pieza fibrosa como haz de guías de luz individuales.

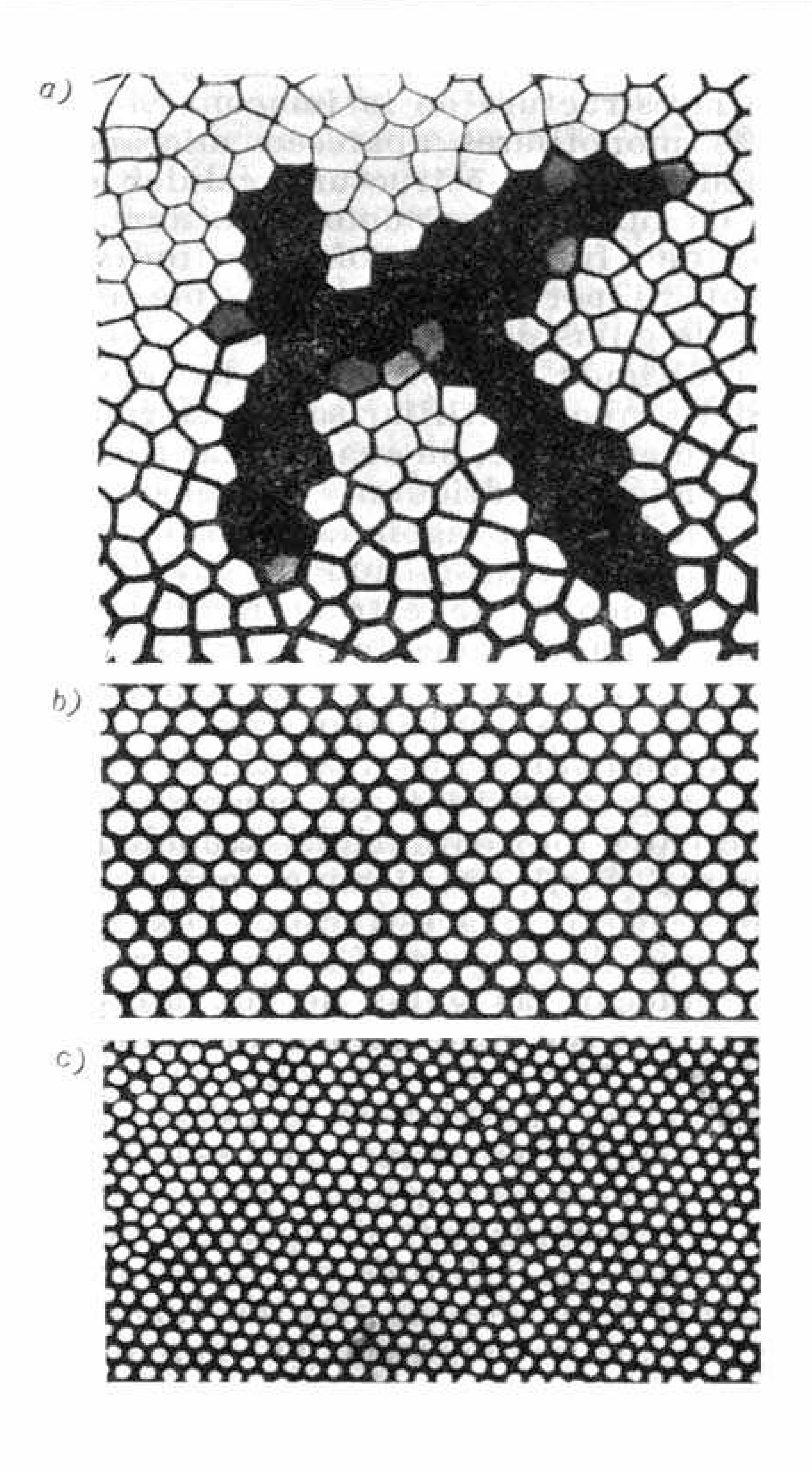
La transferencia de una imagen por elementos es ampliamente conocida en la naturaleza (los ojos de los insectos, la retina, etc.) y se ha difundido en la técnica de los sistemas informativos: el televisor (en la superficie interior de la pantalla del cual se ha aplicado una capa de partículas de luminóforo), la fotoemulsión, la óptica reticular y la poligrafía.

Toda pieza fibrosa descompone la imagen, que ha sido puesta en contacto con su cara de entrada o proyectada sobre la superficie de la última por medio de sistemas ópticos u óptico-electrónicos, en elementos, y transmite al extremo de salida la información relativa a cada elemento a través de un filamento individual.

La imagen que se transmite a través de un haz de guías de luz está constituída por un conjunto de elementos de diferente brillantez, que corresponden a las caras de salida de filamentos individuales, es decir, la imagen se recibe en *forma de mosaico* (fig. 35, *a*). De acuerdo a la construcción de las guías de luz empleados para

——→

FIG. 35. Transferencia de una imagen por un haz de guías de luz


a)
b)
c)

la elaboración de la pieza fibrosa se hace la distinción entre *micromosaicos* y *macromosaicos* en la estructura del haz de guías de luz, y consecuentemente, la estructura de la imagen. Si se utilizan fibras monofilares aparecen micromosaicos determinados por la estructura celular del haz de guías de luz, que es como un sistema de un conjunto de fibras monofilares individuales (fig. 35, *b*). Si por el contrario la pieza fibrosa se fabrica de guías de luz multifilares, al acomodar estos últimos, la estructura hexagonal del interior del grupo multifilar se transforma, en el lindero de su empalme, en cuadricular (fig. 35, *c*). Con disposición cuadricular, la densidad filar es menor que en la hexagonal. Consecuentemente varía también la transmisión de luz y aparece un macromosaico en la estructura que consiste en que se notan claramente las fronteras entre las guías de luz multifilares. Este defecto único de la construcción multifilar resultó ser, sin embargo, eliminable. Los investigadores soviéticos demostraron en 1971 que con ayuda de los correspondientes procedimientos tecnológicos es relativamente fácil, utilizando guías de luz multifilares, lograr una estructura hexagonal en todo el campo de la pieza fibrosa; para ello es suficiente colocar las guías de luz multifilares desplazados uno de otro en medio diámetro de fibra individual.

El carácter de mosaico de la estructura deja también su huella en otros parámetros de los artículos fibrosos pone límite al poder resolutivo admisible (alcanzable en el aparato), conduce a una considerable pérdida de la información transmitida y de la transmisión de luz y limita el poder resolutivo nominal del haz de guías de luz.

Multiplicidad del aumento de la imagen transmitida. La imagen aceptable de la cara de salida

de una pieza fibrosa es restringida. Como se sabe, el ojo resuelve objetos de un tamaño cercano a 100 μ. Si la imagen de la cara de salida se examina por medio de un ocular, con un aumento tal que los elementos de la estructura tengan un tamaño de 100 μ, es decir, que se hagan distinguibles, el cuadro que se observa va a ser de tipo mosaico molesto, desagradable a la vista y difícilmente analizable. En tal caso, cualquier defecto del haz, por ejemplo la presencia de filamentos que no dejan pasar la luz, deviene distinguible y perturba la observación. Al ampliar la cara de salida se amplían también los filamentos y las envolturas, pero la multiplicidad permisible de ampliación es restringida por el diámetro de los filamentos. En efecto, con un espesor de las envolturas de 0,5 a 1,0 μ, el aumento está limitado a un tamaño de 100 μ y la multiplicidad admisible es, respectivamente, de 200 a 100. Si en este caso el diámetro de los filamentos está entre 2 y 5 μ, la multiplicidad admisible se encontrará respectivamente entre 50 y 20. Utilizando una pieza fibrosa que tenga filamentos y envolturas del diámetro y el espesor indicados en el ejemplo dado, los límites del aumento permisible son en muchos casos enteramente aceptables.

No obstante, en muchos tipos de instrumentos se utilizan guías de luz — focones (fig. 36, *a*), en los cuales el diámetro de los filamentos es mayor en la cara de superficie más amplia. El poder resolutivo de los focones se determina por el diámetro de sus filamentos sobre la cara de entrada perceptora de la luz. Si se exige un poder resolutivo del focón de 100 líneas/mm (es decir, con diámetro de los filamentos de 4 μ y el espesor de las envolturas de 1 μ) y una multiplicidad de su aumento de 5, entonces el diámetro de los filamentos sobre la cara grande de salida del

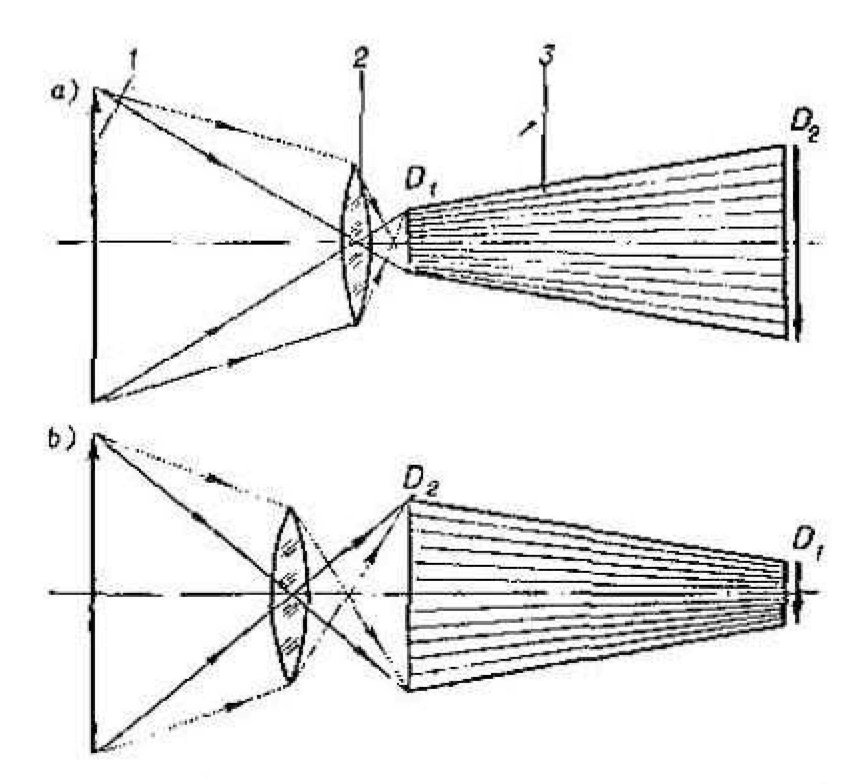


FIG. 36. Transferencia de una imagen por los focones: *1*—objeto; *2*—objetivo; *3*—focón

focón debe ser de 4 μ × 5 = 20 μ. En tal caso la multiplicidad admisible de aumento de la imagen de la cara de salida, por ejemplo con ayuda de un ocular, está restringida a una magnitud de 100 μ/20 μ = 5. El aumento total del sistema focón-ocular es de 25 (5× 5), que equivale a 100 μ por las 4 μ del diámetro de un filamento sobre la cara de entrada pequeña del focón.

Densidad de la información y pérdidas de la misma. El volumen I_1 de la información transmitida por una pieza fibrosa con cara de entrada de área S se determina por la expresión

$$I_1 = R^2 S = \frac{S}{4D_f^2}. \qquad (38)$$

En virtud del principio de transmisión de la información elemento a elemento en un haz de guías de luz, para la determinación del volumen de la información transmitida se toma, junta-

mente con I_1, el coeficiente I_2 que determina el número de filamentos individuales arreglados hexagonalmente (o sea, el número de elementos transmitidos de la imagen) que corresponden a una superficie S de la pieza,

$$I_2=\frac{S}{S_f}=\frac{S}{0{,}865D_f^2}, \tag{39}$$

donde S_f es el área que ocupa un filamento individual juntamente con su envoltura. De aquí resulta que la densidad de información que caracteriza el número de elementos de la imagen transmitidos por una unidad de área es

$$i_2=\frac{1{,}156}{D_f^2}. \tag{40}$$

Como consecuencia del carácter de mosaico de la estructura del haz de guías de luz tiene lugar una *pérdida de información*. Las expresiones (38—40), que caracterizan el volumen y la densidad de la información transmitida, no reflejan las pérdidas de información que de hecho tienen lugar cuando se utilizan piezas fibrosas. Anotemos como ejemplo el hecho de que las fórmulas (38—40) no tienen en cuenta la forma de la sección de los filamentos. Si se considera que cada filamento homogeniza sobre la cara de salida la distribución de luminosidad, compleja y de rica gama, por la superficie de un elemento dado de la imagen, entonces se justifica, estrictamente hablando, la afirmación de que las piezas fibrosas transmiten solamente parte de la información relativa al objeto original. En este caso, difiere del original la imagen transmitida por la pieza fibrosa y reproducida sobre su cara de salida. Naturalmente, la cantidad de información y la semejanza de la imagen al original son tanto más altas cuanto mayor sea el número de elementos

en que se ha dividido la imagen primitiva, es decir, cuanto mayor sea la cantidad de los filamentos en un haz de guías de luz dado (o cuanto menor sea el diámetro de cada filamento). Sin embargo, la disminución indefinida del diámetro de los filamentos es imposible, lo que restringe la densidad de información que puede transmitir una pieza fibrosa.

El haz de guías de luz transmite solamente la información contenida en la parte de la superficie de la cara de entrada que está ocupada por los filamentos guías de luz correspondientes y cuya área designaremos por τ_5. De esta manera, una segunda causa de pérdida de la información es el grado de ocupación de la cara de entrada por los filamentos, puesto que ya en esa misma cara del haz de guías de luz se pierde una cantidad de información igual a $1 - \tau_5$.

También ocurren pérdidas de información por causas puramente tecnológicas. Para transmitir una imagen con ayuda de elementos fibrosos es esencial la correspondencia precisa de la distribución de las caras de las guías de luz individuales sobre ambas caras del haz, si bien en la parte media del haz las guías individuales pueden estar entrelazadas de cualquier manera. La violación de la identidad de distribución de los filamentos sobre ambas caras de la pieza conduce a la destrucción de la semejanza de la imagen transmitida a la original. Y en fin de cuentas esto equivale a pérdida de información.

Por diferentes causas tecnológicas sucede a veces que en una pieza fibrosa ya acabada algunos filamentos individuales o grupos de ellos no dejan, en parte o completamente (fig. 37), pasar la luz, con lo cual el elemento dado de la imagen (o el grupo de ellos) se pierde.

Para reducir pérdida de información es esencial la exigencia de hexagonalidad de la colocación

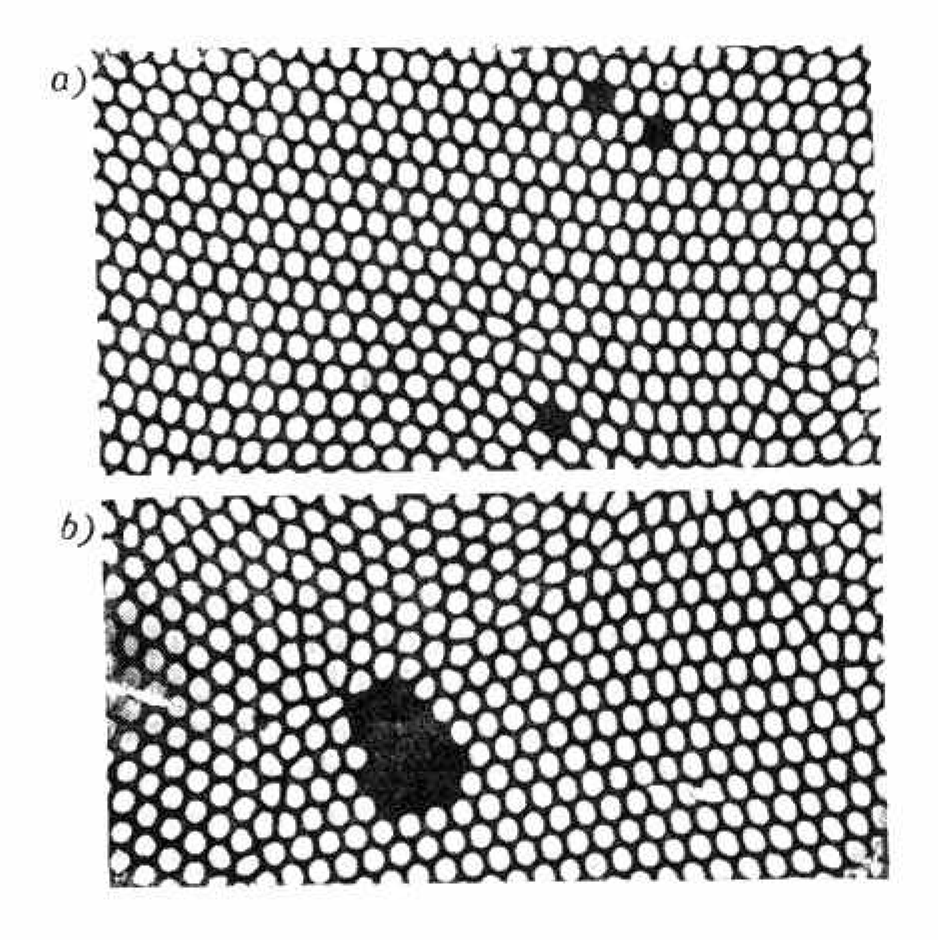


FIG. 37. Pérdida de información durante la transmisión de una imagen por un haz de guías de luz a causa de que un filamento individual (*a*) o un grupo de filamentos (*b*) no dejan pasar la luz

de todos los filamentos en todo el campo de trabajo de la pieza fibrosa.

Limitaciones del poder resolutivo R del haz de guías de luz. El método del estiramiento repetido del paquete de guías de luz monofilares permite disminuir el diámetro de los filamentos a pequeñas dimensiones y, por lo mismo, garantiza fácilmente la realización tecnológica de cualquier poder resolutivo teórico («geométrico») de las piezas fibrosas, calculable por la fórmula (37). A pesar de ello, el poder resolutivo del haz de guías de luz es restringido y a tal grado que muchos sistemas ópticos poseen un poder resolutivo varias veces superior a la resolución de las piezas fibrosas. Según la opinión

del científico soviético D. Yu. Galpérn, el límite de resolución de los sistemas de lentes contemporáneos, cuando su abertura numérica está entre 0,5 y 1,0, es de 1,0 a 0,5 μ, mientras que la resolución de las piezas fibrosas en el mejor de los casos no sobrepasa 10 μ.

A continuación se enumeran los factores fundamentales que restringen el poder resolutivo del haz de guías de luz.

1. Limitación difraccional *R*. Aunque los experimentos demuestran que la radiación se propaga en parte por las fibras incluso cuando los filamentos tienen un diámetro de sólo una micra o menos; sin embargo, cuando dicho diámetro es conmensurable con la longitud de onda de la radiación, a causa de la difracción (fenómeno por el que la luz se desvía de la ley de la propagación rectilínea: difracción significa doblamiento, encorvamiento), las fibras empiezan a actuar como quías de ondas, y una parte considerable de la energía se escapa a través de la frontera de separación filamento — envoltura. De acuerdo al flujo útil Φ_n en la salida esto conduce a una fuerte dispersión y ampliación de la abertura de salida del flujo Φ_n; como resultado de esto, los rayos Φ_n tienen una inclinación con respecto al eje de la pieza considerablemente mayor que u_0. La misma fuerte dispersión (ampliación de la abertura de salida) la experimentan también los rayos de otros componentes del flujo. Todo esto conduce a un contraste de la imagen transmitida extraordinariamente bajo y no aceptable en la práctica.

2. Limitaciones de los aparatos *R*. Incluso si se desprecian las limitaciones difraccionales (supongamos que las exigencias del sistema respecto al contraste de la imagen son bajas) o se disminuye su acción por medio de algún método, como regla general aparecen limitaciones de

carácter instrumental, debido a las cuales otros parámetros ópticos del haz de guías de luz no satisfacen la sensibilidad del sistema dado. Por ejemplo, si el diámetro de los filamentos es de 1μ y el espesor de la envoltura aisladora de luz es igualmente de 1 μ, se tiene una resolución teórica de $R = (2D_f)^{-1} = 250$ líneas/mm, y un coeficiente de relleno de la cara por los filamentos de solamente 0,226, o sea, que incluso si *se desprecian* todas las demás fuentes de pérdidas luminosas (véase. el cap. II) y se toma $A_0 > 1$, de todo el flujo incidente solamente cerca del 23% lo constituye el flujo útil, y en la inmensa mayoría de los sistemas no es aceptable.

La situación no se mejora mucho cuando el diámetro de los filamentos es igual a 1,5 y 2,0 μ; con el mismo espesor de las envolturas de 1 μ, la resolución teórica es de 200 y 167 líneas/mm respectivamente, y los coeficientes de ocupación, de 0,32 y 0,40. En todos los casos, el engrosamiento del filamento conductor o de la envoltura rebaja la resolución teórica, y el aumento del grosor de la envoltura reduce el coeficiente de relleno τ_5.

3. Limitaciones de construcción R. Para disminuir la escala y aumentar la luminosidad de la imagen, en muchos aparatos se utilizan piezas fibrosas en forma de focón reductor (fig. 36, *b*). En este caso, el poder resolutivo del sistema se determina por el diámetro D_2 de una fibra sobre la cara grande de entrada del focón: $R = (2D_2)^{-1}$. Si se tiene en cuenta la necesidad de concordancia entre las aberturas de entrada y de salida de los elementos del sistema, entonces la disminución posible (es decir la multiplicidad del cambio de la escala) del diámetro sobre la cara de entrada está restringida por el diámetro de las fibras sobre la cara pequeña de salida, la cual está sujeta a limitaciones difraccionales,

En tales piezas fibrosas, el coeficiente de relleno por los filamentos de la cara de entrada es igual al relleno de la cara de salida (es decir, sobre la cara de entrada, los filamentos están rodeados por envolturas más gruesas), puesto que con los procesos tecnológicos existentes hoy en día la relación entre el diámetro de los filamentos y el espesor de las envolturas es igual en ambas caras. En principio es posible diseñar focones en los cuales el grosor de las envolturas aisladoras de luz en cada una de las caras sea el mínimo permisible. Pero la verificación en la práctica de tales procedimientos tecnológicos ha demostrado la extraordinaria complejidad de su realización.

8. METODOS DE ELIMINACION DEL CARACTER MOSAICO DE LA IMAGEN

El carácter de la estructura del haz de guías de luz y de la imagen transmitida constituye uno de los defectos desagradables —aunque objetivamente existentes— de las piezas fibrosas, que rebajan de hecho todas sus características ópticas. Por esta razón, los especialistas de la optotécnica de guías de luz permanentemente buscan y elaboran diferentes métodos para disminuir la influencia del carácter mosaico de la estructura en los artículos fibrosos y de su completa eliminación. Examinemos los métodos conocidos hoy en día.

Haces de guías de luz en desplazamiento transversal. Con una rápida y desordenada traslación transversal de la pieza fibrosa con respecto a la imagen fija proyectada sobre su cara de entrada, se logra una elevación sustancial del poder resolutivo y del coeficiente de transmisión de contraste del haz de guías de luz (y, respectivamente, del

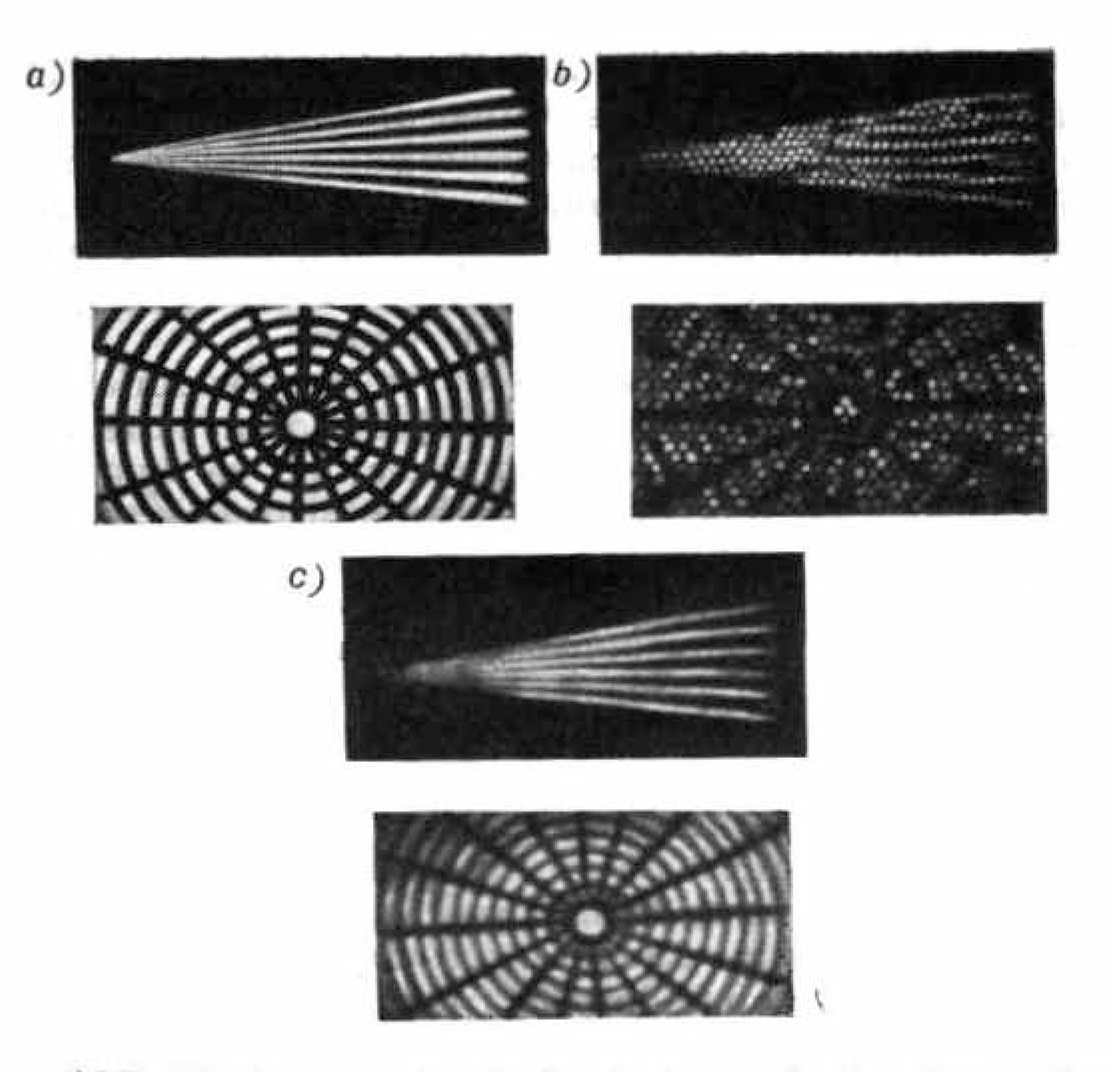


FIG. 38. Comparación de las imágenes de dos objetos (*a*) con sus imágenes transmitidas por haces de guías de luz inmóvil (*b*) y en vibración transversal (*c*)

volumen de información y del contraste de la imagen transmitida). Si se agita rápidamente y en desorden la cara de entrada del haz de guías de luz frente a la imagen que se quiere transmitir y la cara de salida ejecuta idénticos desplazamientos, tiene lugar una atenuación del carácter mosaico de la imagen y de la defectuosidad de la estructura de la pieza fibrosa (fig. 38). Resulta que para borrar todas las señales de la estructura en la imagen final, es suficiente desplazar el haz de guías de luz en unos cuatro o cinco diámetros de las fibras individuales con una fre-

cuencia de vibración desordenada superior a la frecuencia crítica de centelleo distinguible por el ojo humano. En tal caso, en cada posición del filamento en vibración, la luminosidad de su tope de salida es uniforme, pero varía en dependencia del brillo del elemento de la imagen que se transmite en un instante dado.

Los haces de guías de luz en desplazamiento transversal eliminan por completo una serie de motivos de pérdida de información, ya que en tal caso los filamentos en vibración recubren la superficie que ocupaba en la pieza inmóvil la envoltura aisladora de luz; por esto el coeficiente de relleno de la cara por los filamentos no conduce a la pérdida de información.

De la misma manera se disminuye sustancialmente la influencia de las causas tecnológicas de pérdida de información (tales como la ausencia de semejanza de la imagen con el objeto y los filamentos no transparentes,) puesto que los elementos de la imagen que antes se perdían a causa de la opacidad de filamentos, o se desfiguraban por violación de la identidad de distribución de éstos sobre ambas caras de la pieza fibrosa, son ahora «citados» y transmitidos por otros filamentos.

En virtud del desorden del desplazamiento del haz de guías de luz, la forma de colocación de los filamentos no influye sobre el volumen de la información transmitida. El poder resolutivo del haz es prácticamente el mismo siendo la estructura cuadricular o hexagonal. El haz de guías de luz en vibración transmite particularidades más sutiles de la distribución de luminosidad en la imagen primitiva, las cuales no son resueltas en una pieza inmóvil.

De tal suerte, un haz de guías de luz en vibración se distingue por una pérdida de información considerablemente menor que uno inmóvil. Al

eliminar por completo el carácter mosaico y la defectuosidad de la estructura de las piezas fibrosas, el método en cuestión conduce a una elevación de su poder resolutivo y del coeficiente de transmisión de contraste. El poder resolutivo de un haz de guías de luz en vibración se determina por la fórmula

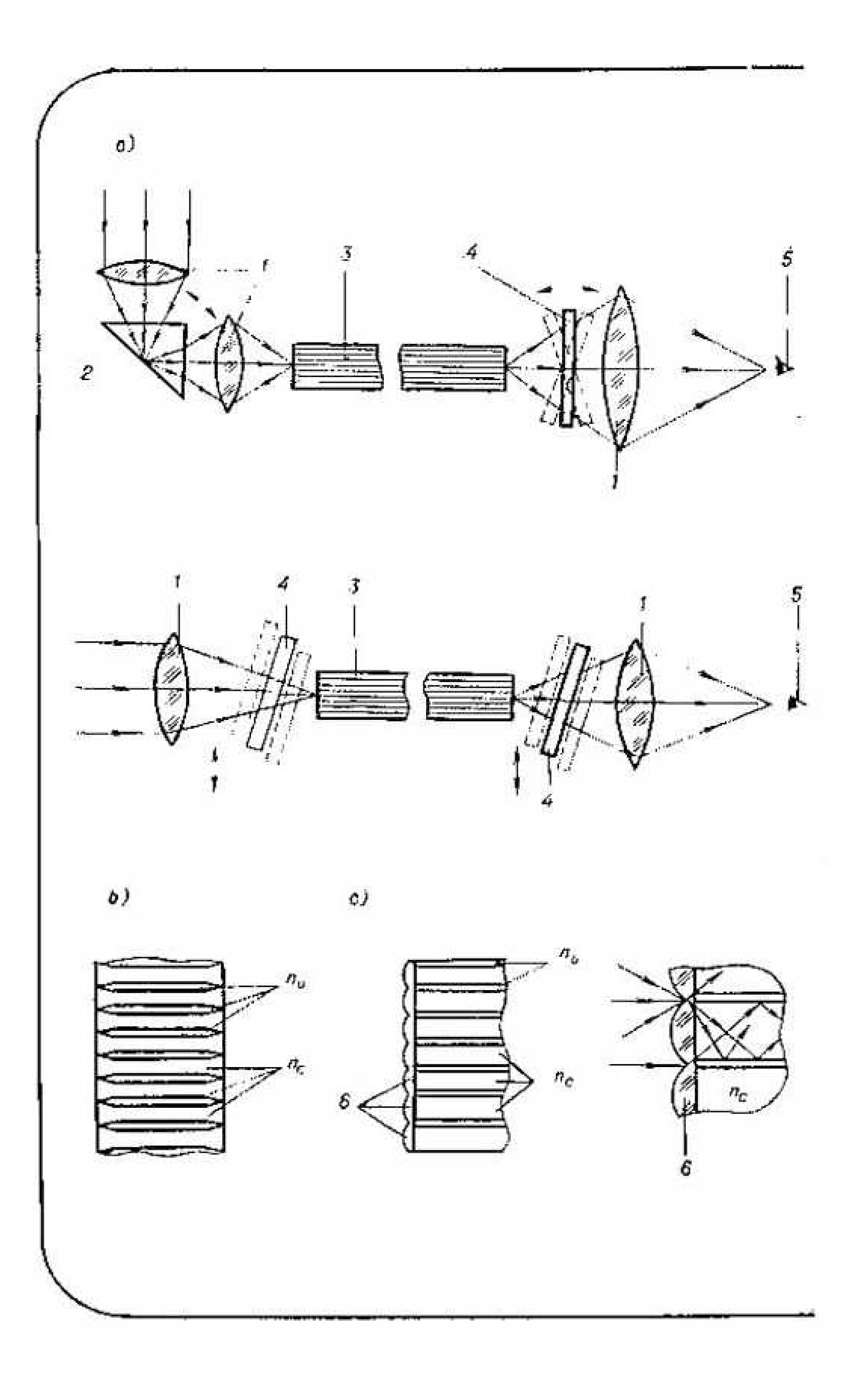
$$R = \frac{1,22}{D_f}, \qquad (41)$$

y, como se ve al comparar esta última con la (37) y (41), supera más de dos veces el poder resolutivo del haz inmóvil.

Sin embargo, tal método resultó, en la práctica de construcción de aparatos, completamente no viable, puesto que requiere la vibración de toda la pieza fibrosa si su construcción es rígida; y si es flexible, la vibración sincrónica de ambos extremos. Los mecanismos vibratorios resultan pesados, voluminosos y poco seguros; además, cuando la estructura del haz de quías de luz vibrante es flexible, tiene lugar la destrucción de las fibras.

Vibración de la imagen con respecto al haz de guías de luz. Las ventajas de método de eliminación del carácter mosaico de la imagen por medio de un haz de guías de luz vibrante son tan notables, que no se puede renunciar a su utilización únicamente a causa del defecto señalado.

El carácter mosaico se elimina gracias al desplazamiento del haz de guías de luz *con respecto* a la imagen. El mismo efecto se logra al desplazar la imagen con respecto al haz de guías de luz y observarla sobre la cara de salida con el mismo sistema, que compensa sincrónicamente las vibraciones de la imagen con respecto a las fibras. Para ello se colocan en los sistemas de visión directa placas de vidrio planoparalelas en los extremos de entrada y de salida del haz de guías de luz,



a)
1
3
4
5
2
1
1
4
3
1
5
1
4
b)
c)
n_c
n_c
6
n_c
6

o prismas en los sistemas de observación lateral, que se ponen en vibración como se muestra en la figura 39, *a*. Como evidencia el paso de los rayos, con diferentes posiciones de las placas o de los prismas, un mismo rayo va a incidir en diferentes puntos de la cara de entrada del haz de guías de luz. La amplitud de las vibraciones de las placas o de los prismas se elige de tal manera que las oscilaciones de un elemento de la imagen con respecto al haz de guías de luz sean iguales a unos cuatro o cinco diámetros de una fibra individual. Con esto el carácter mosaico se elimina prácticamente por completo. La realización de la vibración sincrónica de las placas de vidrio o de los prismas en las caras de entrada y de salida de la pieza es considerablemente más simple que la de la propia trenza de fibras.

Haces inestructurados de guías de luz. Por diferentes procedimientos tecnológicos se fabrican piezas fibrosas (fig. 39, *b*) en las cuales las envolturas aisladoras de luz se reducen a la nada en las caras, conservándose en la parte restante de la longitud de los filamentos. Este método al reducir sustancialmente el carácter mosaico de la imagen, no aumenta el poder resolutivo de la pieza, pero contribuye a la elevación del coeficiente de transmisión de contraste del haz de guías de luz.

Microlentes sobre los topes de los filamentos. El científico soviético V. B. Weinberg propuso un método para eliminar el carácter mosaico de la imagen y elevar la transmisibilidad luminosa de las piezas fibrosas por medio de la aplicación de microlentes en las caras de entrada y de salida

←——

FIG. 39. Eliminación del carácter mosaico de una imagen transmitida por un haz de guías de luz:

1—lentes; *2*—prisma; *3*—haz de guías de luz; *4*—placas de vidrio planas y paralelas; *5*—ojo; *6*—microlentes

de cada filamento (fig. 39, *c*). Teniendo en cuenta la condición de concordancia de las aberturas de los elementos del sistema, la curvatura de las microlentes y el índice de refracción del material se eligen de tal modo que cualquier rayo, una vez atravesada la lente, cae necesariamente sólo en la cara de entrada de un filamento. En las caras de entrada de las envolturas no incide prácticamente ningún rayo, o sea, si se respeta el principio de concordancia de las aberturas, la aplicación del método de Weinberg garantiza que todo el flujo incidente va a ser útil. Esto permite elevar sustancialmente el coeficiente de transmisión de contraste del haz de guías de luz, y, gracias a que todos los rayos inciden únicamente sobre las caras de los filamentos, se puede considerar que el coeficiente de relleno de la cara por los filamentos es igual a 1. Este método no aumenta el poder resolutivo de la pieza, pero eleva sustancialmente el coeficiente de transmisión de contraste de las guías de luz y su capacidad para dejar pasar flujo luminoso útil.

Filtración espacial óptica de la estructura. En los haces de guías de luz, los trozos defectuosos están distribuidos generalmente en desorden a lo largo de la pieza. La estructura mosaica de los artículos fíbricos está sujeta a una rigurosa ley de distribución en toda la cara y es equivalente a una frecuencia determinada de las rayas. Para eliminar el carácter mosaico de la imagen, se pueden utilizar filtros ópticos (los llamados de ruido de fase y de ruido de amplitud). En tal caso, la imagen del objeto *1* se proyecta (fig. 40) por medio del objetivo *2* a la cara de entrada de la pieza *3*; la imagen que transfiere el haz de guías de luz es proyectada por el objetivo *5* a la pantalla *6*. Delante del objetivo *5* se coloca un filtro óptico *4*, sobre cuya superficie se aplica, con la distribución de perfil requerida, un recu-

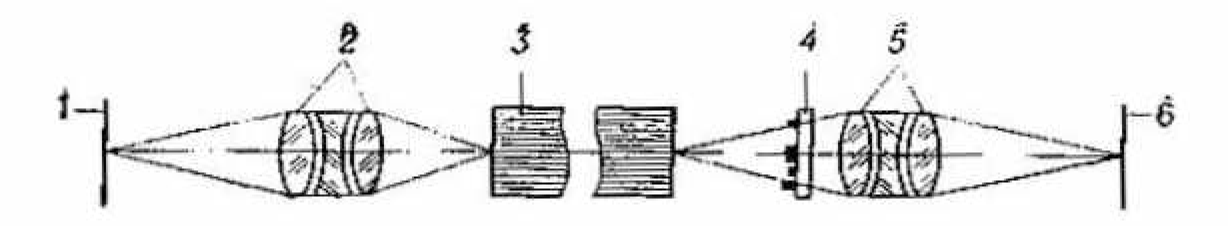


FIG. 40. Sistema para la filtración espacial del cuadro de la estructura propia de un haz de guías de luz en una imagen transmitida por un cordón fibroso inmóvil

brimiento transparente (filtro de fase) o absorbente de luz (filtro de amplitud).

El filtro *4* en el sistema pieza fibrosa — filtro — objetivo funciona de tal manera que puede cambiar ya sea el coeficiente de transmisión de contraste del sistema para una determinada frecuencia de las rayas, ya sea su capacidad para dejar pasar una determinada frecuencia. Así pues, si el carácter mosaico de una pieza fibrosa dada va a corresponder a una frecuencia dada de las rayas ν_c, entonces para esta frecuencia y con ayuda de un filtro, el sistema haz de guías de luz — filtro — objetivo poseerá un coeficiente de transmisión de contraste muy bajo, o no va a dar paso en absoluto a esta frecuencia, con lo cual o se elimina por completo o se reduce el carácter mosaico de la imagen. Mediante un método análogo se logra también eliminar (filtrar) los defectos de las piezas fibrosas. En esencia, un filtro óptico es un filtro de información que detiene una parte de ella reduciendo su volumen y la transmisibilidad luminosa del sistema.

En la figura 41 se muestran las fotografías de una imagen que se ha transmitido a través de un mismo haz de guías de luz, con regímenes estático de trabajo en el primer caso y dinámico en el segundo y utilizando un filtro óptico espacial en el tercero. Al vibrar el haz de guías de luz se logra realmente, como se ve en la figura 41, *b*, una ganancia en la resolución, eliminándose por

otra parte el carácter mosaico de la imagen. Este carácter de la imagen desaparece al aplicar un filtro óptico espacial, pero a causa del mismo se reduce también el volumen de la información transmitida, incluso si se lo compara con el del haz de guías de luz fijo. El defecto señalado restringe la aplicación del método de filtración óptica espacial para la eliminación del carácter mosaico de la imagen.

Método de eliminación espectral del carácter mosaico de la estructura. Este métdo es extraordinariamente interesante para los sistemas ópticos de observación. En él, la imagen del objeto (fig. 42) se transmite a través de un objetivo, un prisma Amici y un objetivo de proyección a la cara de entrada del haz de guías de luz, repitiéndose tal sistema óptico idénticamente al otro lado de la cara de salida. La luz blanca que sale de un elemento dado de la imagen se descompone dentro del prisma en un espectro que es proyectado a la vez a varios filamentos de la cara de entrada. Por ejemplo, la luz blanca que sale del punto *A* incide, después del prisma, en la cara del haz de guías de luz, de tal forma que al filamento *1* llega un rayo azul, al *2*, amarillo y al *3*, rojo. Al otro lado, el sistema óptico idéntico reúne esos rayos en un solo punto, que es la imagen del punto *A*. La luz blanca del punto *B* después de descomponerse en el espectro incide también en la cara de entrada de la pieza, pero su rayo azul cae en el filamento *2*, el amarillo, en el *3* y el rojo en el *4*. A la salida, la imagen del punto *B* se recompone de la misma manera que la del *A*. De tal suerte, en este método cada filamento transmite no la imagen de un elemento

——→

FIG. 41. Fotografías de una imagen que se ha transmitido por haces de guías de luz inmóvil (*a*) y en vibración (*b*) y utilizando la filtración espacial

a)



b)



c)



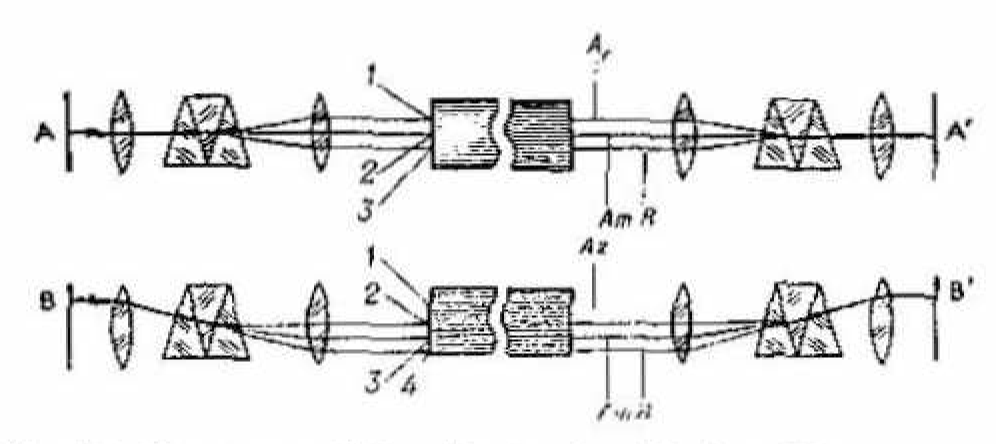


FIG. 42. Esquema del método de eliminación espectral del carácter mosaico de la estructura de una imagen transmitida por un haz de guías de luz

dado del objeto, sino sólo una parte de la información (en este caso espectral) de un conjunto de elementos diferentes de la imagen, o sea, la radiación de un elemento dado del objeto es transmitida, descompuesta en el espectro, por varios filamentos.

Semejante método de transmisión de la imagen elimina las pérdidas de información destruyendo la microidenticidad en la disposición de los filamentos sobre las caras de la pieza. Si algunos filamentos dejan pasar la radiación sólo en parte o son completamente opacos, ello no implica la pérdida completa de la información acerca de un elemento dado de la imagen; se pierde solamente una parte, lo cual cambia un poco la coloración del mismo. El carácter de la disposición de los filamentos tampoco conduce a la pérdida de la información sobre un elemento dado. En el método descrito, el coeficiente de relleno de la cara por los filamentos influye sobre la transmisibilidad luminosa de la pieza fibrosa.

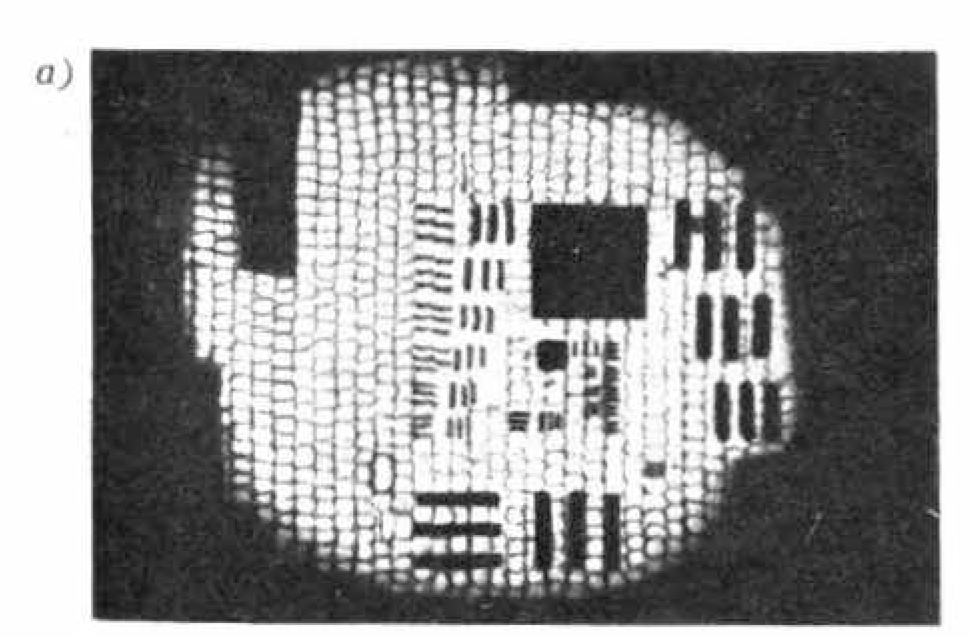
Debido a que a través de cada filamento se propaga una radiación con diferentes longitudes de onda, cada filamento a la salida constituye, en realidad una fuente de luz casi blanca. Por esto al proyectar la imagen de la cara de salida

sobre la pantalla, cada filamento produce espectro y los espectros de los filamentos vecinos se superponen parcialmente unos sobre otros, pero no se nota el carácter mosaico de la imagen, y la representación del objeto original se forma de manera precisa y rigurosa en el «enmarañado» cuadro.

La transmisión de una imagen descomponiendo la radiación de cada elemento del objeto en sus colores componentes (longitudes de onda), la subsecuente transferencia de los últimos por filamentos aislados y la reunificación posterior de los colores individuales, después de salir del haz de guías de luz, en un solo punto del plano de la imagen, permiten aumentar el poder de resolución de las piezas fibrosas al doble del valor calculable por la fórmula (37), elevar notablemente el coeficiente de transmisión de contraste del haz de guías de luz y eliminar por completo el carácter mosaico de la imagen (fig. 43).

Aunque existen, como testimonia lo expuesto, diferentes métodos para eliminar el carácter mosaico de la iamgen, y algunos de ellos incluso permiten aumentar sustancialmente el poder resolutivo y el coeficiente de transmisión de contraste de las piezas fibrosas, no obstante el problema de la eliminación del carácter mosaico no ha sido resuelto definitivamente. En efecto, el haz de guías de luz en vibración, el movimiento oscilatorio de las placas de vidrio y de los prismas, las microlentes sobre las caras de los filamentos, la filtración espacial óptica y el método de la compensación espectral del carácter mosaico son viables únicamente en sistemas ópticos, además de que a menudo las exigencias con respecto a la construcción de aparatos ópticos excluyen la posibilidad de emplear cualquiera de los métodos examinados. Sólo las piezas fibrosas inestructuradas pueden ser utilizadas tanto

a)



b)

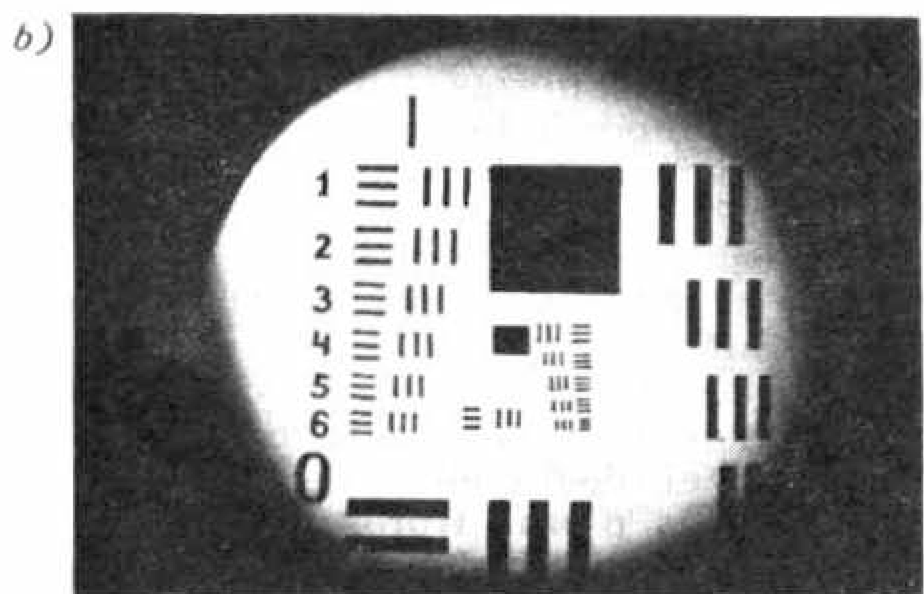


FIG. 43. Fotografía de una imagen transmitida por un haz de guías de luz sin utilizar el método espectral de eliminación del carácter mosaico (*a*) y utilizando el mismo (*b*)

en aparatos ópticos como en óptico-electrónicos, pero la efectividad de este método es inferior a la de las microlentes, la de la compensación espectral y la de las placas vibrantes.

Por esta razón, el problema de eliminar el carácter mosaico de la imagen atrae cada vez más

la atención de un amplio círculo de especialistas. Las investigaciones en esta dirección se llevan a cabo a ritmo acelerado.

9. CARACTERISTICAS OPTICAS DEL HAZ DE GUIAS DE LUZ

La transmisión de luz, el poder resolutivo, la característica frecuencia — contraste, la heterogeneidad interelemental (ruido microestructural) de los parámetros ópticos a lo largo de la pieza — resultante de la estructura mosaica de cualquier haz de guías de luz — y la defectuosidad consistente en la pérdida parcial o total de algunos filamentos o grupos de ellos de la transmisión de luz, constituyen las características ópticas fundamentales de un haz de guías de luz, las cuales determinan la posibilidad de su aplicación en un aparato concreto.

Transmisión de luz del haz de guías luminoconductores. En el capítulo II fueron examinadas as cuatro causas básicas de pérdidas de luz en las guías de luz monofilares. En el haz de guías de luz existe también otra causa de pérdida de luz que es el área que ocupan sobre la cara de entrada las envolturas aisladoras de luz. Si un manojo cónico de rayos incidente sobre la cara de entrada tiene una abertura $u_1 \leqslant u_0$, solamente será útil la parte del flujo incidente que cae sobre las caras de entrada de los filamentos. La pérdida de luz condicionada por la presencia de las envolturas se caracteriza por el coeficiente τ_5 de relleno de la cara del haz de guías de luz por los filamentos de guías de luz. En dependencia del diámetro de los filamentos, del carácter de su disposición, del espesor de las envolturas y del método de cobertura de los extremos del haz de guías de luz, la superficie de la cara ocupada por las envolturas constituye del 10

al 50% del área de toda la cara. La transmisibilidad luminosa total del haz de guías de luz, teniendo en cuenta la expresión (15) y el coeficiente τ_5 de relleno, se determina por la fórmula

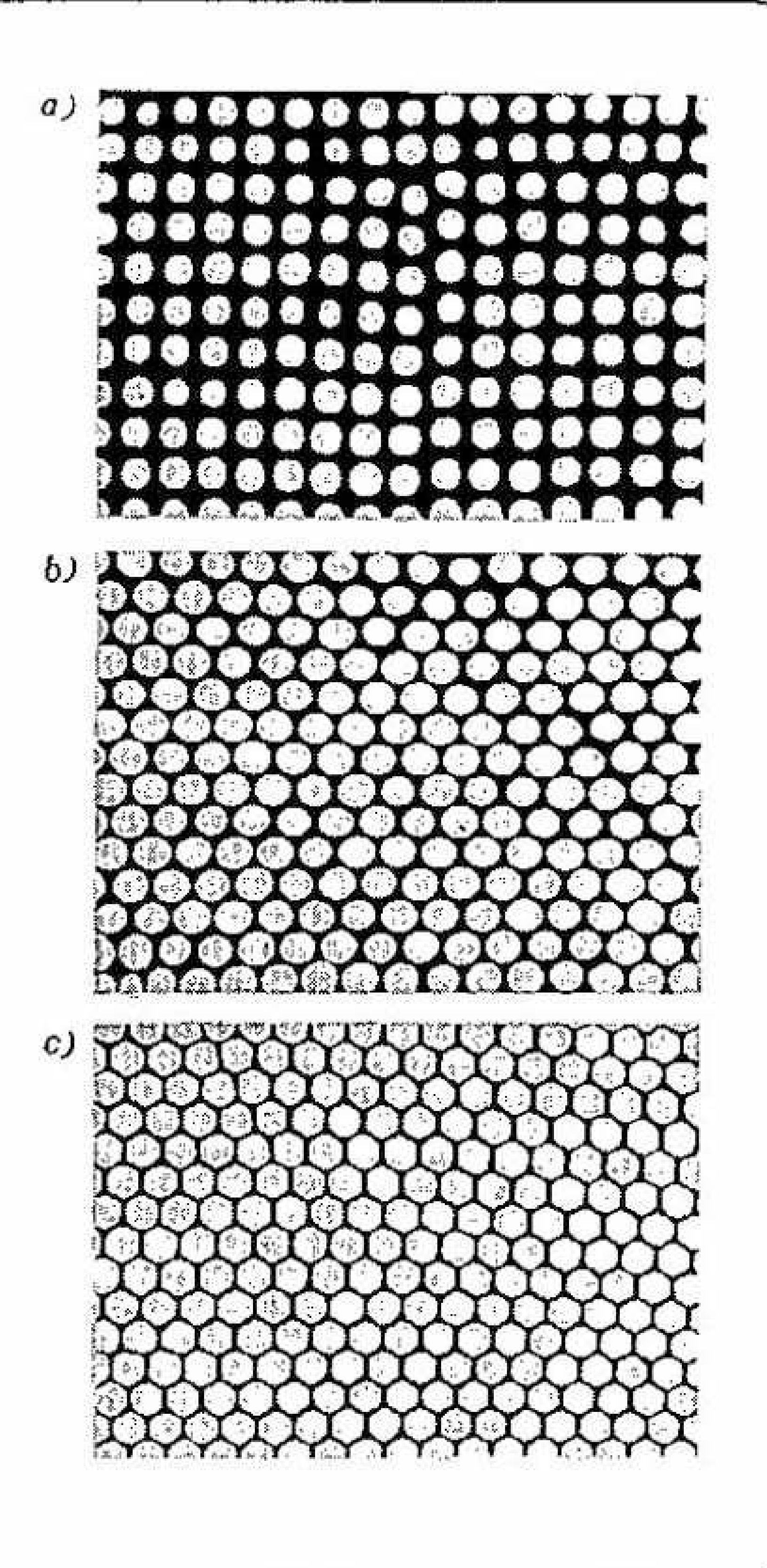
$$T_2 = T_1\tau_5 = \tau_1\tau_2\tau_3\tau_4\tau_5. \qquad (42)$$

El coeficiente τ_5 de relleno comienza a prevalecer sobre las demás causas de pérdidas de luz en las piezas fibrosas de filamentos de poca longitud, cuando la absorción de luz, la dispersión y las pérdidas por reflexión en ambas caras y por las múltiples reflexiones internas son relativamente pequeñas. El coeficiente τ_5 de relleno depende del carácter de la disposición de los filamentos: con una disposición cuadricular (fig. 44, *a*) $\tau_5 = 0{,}785 \quad (D_c/D)^2$, y con una hexagonal, (fig. 44, *b*), τ_5 se eleva hasta $0{,}903 \quad (D_c/D)^2$. Aquí D_c es el diámetro de los filamentos; D, el paso de la disposición, que determina el poder resolutivo del haz de guías de luz por la fórmula (37) y es igual a $D_c + \delta$, siendo δ el espesor de la envoltura aisladora de luz en su lugar más fino. Como se ve en la figura 44, el paso D de la disposición es igual a la distancia entre los centros de filamentos vecinos. Pero si la forma tanto de los filamentos como de las envolturas es hexagonal (fig. 44, *c*), entonces $\tau_5 = (D_c/D)^2$, es decir, la máxima transmisión de luz de un haz de conductores de luz se obtiene con filamentos de corte hexagonal.

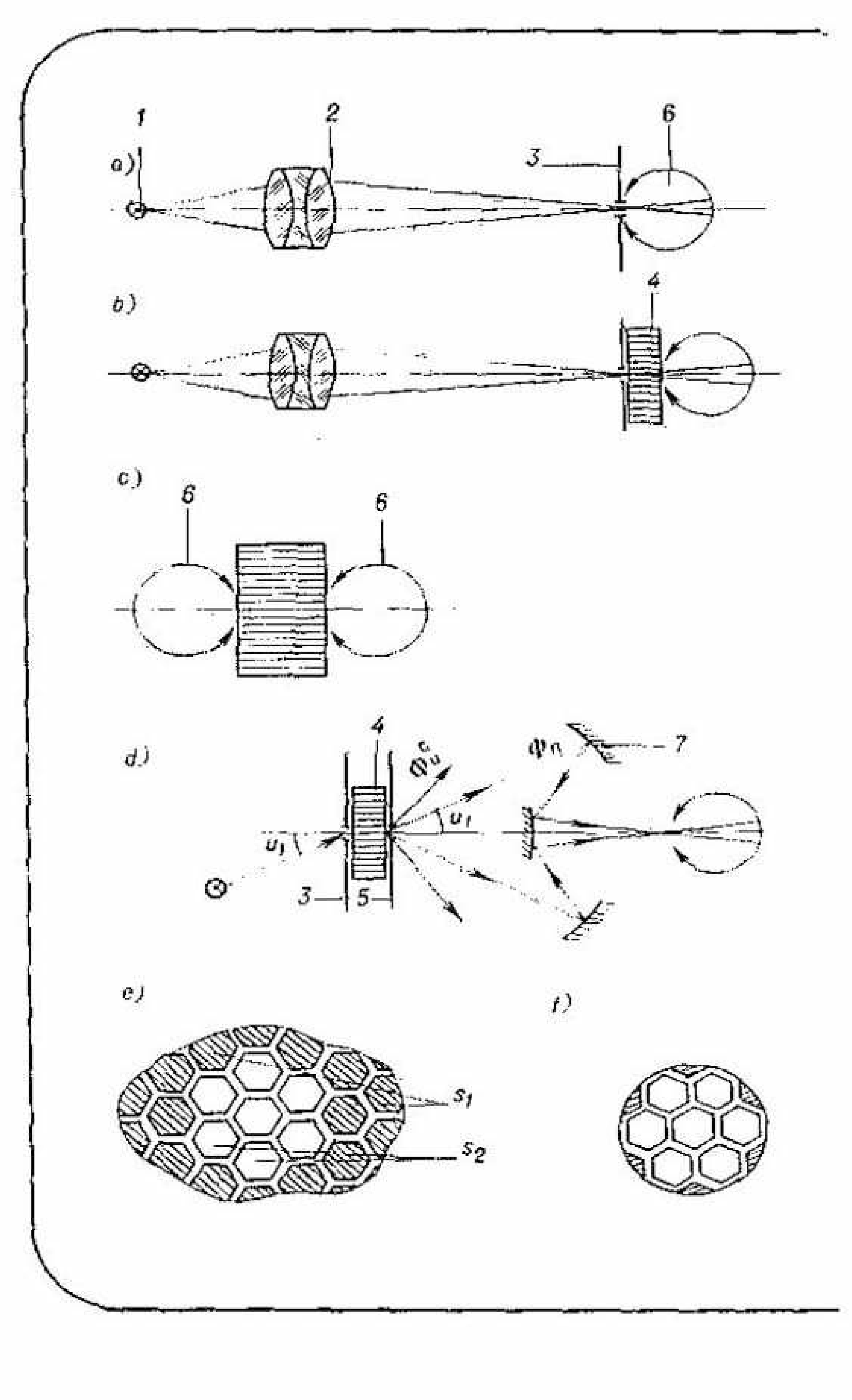
La transmisión de luz del haz de guías de luz se determina generalmente en un dispositivo que consta de un aparato de iluminación y de un receptor de radiación (fig. 45). En tal dispositivo se mide primero el flujo incidente Φ (fig. 45, *a*) y después, el flujo Φ_{np} que pasa a través de la

⟶

FIG. 44. Relleno de la cara de una pieza fibrosa por filamentos conductores de luz



a)
b)
c)



a)
1
2
3
6
b)
4
c)
6
6
d)
4
3
5
7
e)
f)
s_1
s_2

pieza fibrosa (fig. 45, *b*). La relación entre estos dos valores $T = \frac{\Phi_{np}}{\Phi}$ da la magnitud de la transmisión de luz del haz de guías de luz. En una pieza fibrosa la transmisibilidad luminosa para la radiación difusa se mide iluminando la cara de entrada con una esfera fotométrica (fig. 45, *c*). El esquema de medida analizado se utiliza ampliamente para la determinación de la transmisibilidad luminosa total de una pieza fibrosa con disposición irregular de filamentos, es decir, de aquella que está destinada únicamente para transmitir luz a distancia. Como se colige del efecto de los tres anillos, en este caso se mide la transmisión de luz de todos los componentes en total, puesto que en el receptor de radiación inciden todos los componentes del flujo transmitido.

Si el haz de guías de luz está destinado a la transmisión de imágenes, la transmisibilidad luminosa medida según el esquema de la figura 45, *a*, *b*, *c* no caracteriza la transmisión de luz del flujo útil Φ_n; la transmisibilidad luminosa medida es superior a la calculada por la fórmula (31). En la práctica esto conduce frecuentemente a equivocaciones: al ordenar una determinada transmisión de luz del haz de guías de luz sin mencionar el método para medirla, se tiende a creer que la transmisibilidad luminosa medida por el método general (fig. 45, *a*, *b*, *c*) se refiere al flujo útil, pero como el cálculo por la fórmula (31) da un valor menor que el medido, queda clara la

←——

FIG. 45. Esquema de medición de la transmisión de luz de la pieza fibrosa: *a* — del flujo incidente Φ; *b* — del flujo pasado Φ_{pa}; *c* — de la luz difusa; *d* — del flujo útil Φ_n; *e* — cara de salida de la pieza sin diafragma; *f* — cara de salida de la pieza con diafragma:

1—fuente de luz; *2*—condensador; *3*—diafragma de entrada; *4*—pieza fibrosa; *5*—diafragma de salida; *6*—esfera fotométrica; *7*—sistema concéntrico especular-reflectivo

no objetividad del método en cuestión. En realidad, la fórmula (31) da la transmisibilidad luminosa del flujo útil, o sea, precisamente la transmisibilidad que a todos interesa cuando se trata de transmitir una imagen (¡y no simplemente luz!) a través de un haz de guías de luz. En trabajos técnicos, para un haz de guías de luz destinado a transmitir imágenes hay que incluir la transmisibilidad del flujo útil, que es el portador de la información, y no de todo el flujo que pasa, y por consiguiente, utilizar otro método de medición.

Para medir la transmisión de luz solamente del flujo útil, a la salida de la pieza fibrosa se coloca un diafragma *5* (fig. 45, *d*), centrado con el diafragma de entrada *3*. Este último elimina la posibilidad de que incidan al receptor rayos de componentes parásitos, los cuales salen a través de partes de la cara de salida colindantes con los filamentos portadores de flujo útil. Además, la cara de entrada del haz de guías de luz se ilumina a través del diafragma *3* por medio de un haz de rayos dirigido con una cierta inclinación $u_0 > u_1 > 0$. En este caso, a la salida de la pieza aparecen dos anillos luminosos que corresponden a las componentes $\Phi_n + \Phi_u^u$ y Φ_u^c. Para eliminar la incidencia del flujo Φ_u^c al receptor de radiación, la abertura de entrada del último se toma menor que el ángulo de salida de los rayos Φ_u^c del haz de guías de luz (fig. 45, *d*). Todos estos métodos en su conjunto permiten eliminar prácticamente por completo la incidencia al receptor de radiación de componentes parásitos del flujo, es decir, medir la transmisibilidad luminosa del flujo útil.

Para obtener un haz de guías de luz con una alta transmisión de luz de flujo útil, como se deduce de la expresión (42), es necesario lo siguiente:

1) concordancia imprescindible de las aberturas del haz incidente (portador de la información) y del haz de guías de luz ($\tau_1 = 1$);

2) utilización de materiales para los filamentos y las envolturas con el mínimo índice de refracción permisible, que garanticen sólo la abertura numérica A_0 necesaria para reducir las pérdidas por reflexión en ambas caras del haz de guías de luz, es decir, para obtener un alto τ_2; con este fin se utilizan asimismo coberturas clarificantes sobre las caras;

3) utilización de materiales para el filamento y su envoltura con absorción de luz y difusión de la luz mínimas, a fin de obtener un alto τ_3;

4) empleo de materiales y procedimientos tecnológicos que garanticen la minimalización de las pérdidas por reflexión en la frontera filamento — envoltura y utilización de materiales especialmente transparentes también para la envoltura en las piezas fibrosas destinadas únicamente a la transmisión de luz y no de imágenes ($\tau_4 \rightarrow 1$);

5) utilización del espesor mínimo permisible desde el punto de vista del aislamiento de luz de las envolturas, y empleo de la forma hexagonal de los filamentos a fin de obtener un elevado relleno τ_5.

Característica frecuencia — contraste y poder resolutivo del haz de guías de luz. Uno de los criterios básicos para valorar la calidad de la imagen lo constituye su contraste m_ν que se determina por la fórmula

$$m_\nu = \frac{E_{\text{máx}} - E_{\text{mín}}}{E_{\text{máx}} + E_{\text{mín}}}, \tag{43}$$

donde $E_{\text{máx}}$ y $E_{\text{mín}}$ son la luminosidad en la imagen de los detalles claros y de los oscuros, por ejemplo, de las rayas en la imagen de la mira. Un haz de guías de luz transmisor de imágenes se valora por su coeficiente K de transmisión

de contraste,

$$K = \frac{m_\nu}{m_{0\nu}}, \tag{44}$$

donde $m_{0\nu}$ es el contraste de la imagen enviada a la cara de entrada del haz de guías de luz, por ejemplo, de rayas con frecuencia ν; m_ν, el contraste de la imagen a la salida para una frecuencia ν. El coeficiente de transmisión de contraste se determina con diferentes frecuencias de las rayas de la mira; su dependencia de la frecuencia de las rayas se denomina característica frecuencial y de contraste del haz de guías de luz.

En la imagen de la mira transmitida por el haz de guías de luz, a causa de la redistribución del flujo entre las rayas claras y oscuras (véase § 5), la luminosidad E_{min} en la fórmula (43) es diferente de cero, o sea, tiene lugar una disminución del contraste de la imagen transmitida por la pieza fibrosa. La causa de la reducción del coeficiente de transmisión de contraste es la presencia de las componentes Φ_b^c, Φ_b^u, Φ_u^c y Φ_u^u en la salida. De tal suerte, la fórmula (44) para el coeficiente de transmisión de contraste muestra el grado de reducción por la pieza fibrosa del contraste de la imagen en comparación con el original.

Para determinar el coeficiente de transmisión de contraste de un haz de guías de luz, se mide el contraste de la mira para diferentes frecuencias (fig. 46, *a*), para lo cual la mira se ilumina con un microobjetivo de abertura conocida, mientras que otro de abertura dada atrapa los rayos de las rayas claras y oscuras de la mira y los envía al fotorreceptor. Por medio de la fórmula (43) se determina el contraste de las rayas para diferente frecuencia. Después se coloca sobre la mira una pieza fibrosa (fig. 46, *b*) y por un método análogo se determina el contraste de la imagen transmitida, mientras que por la fórmula (44) se calcula

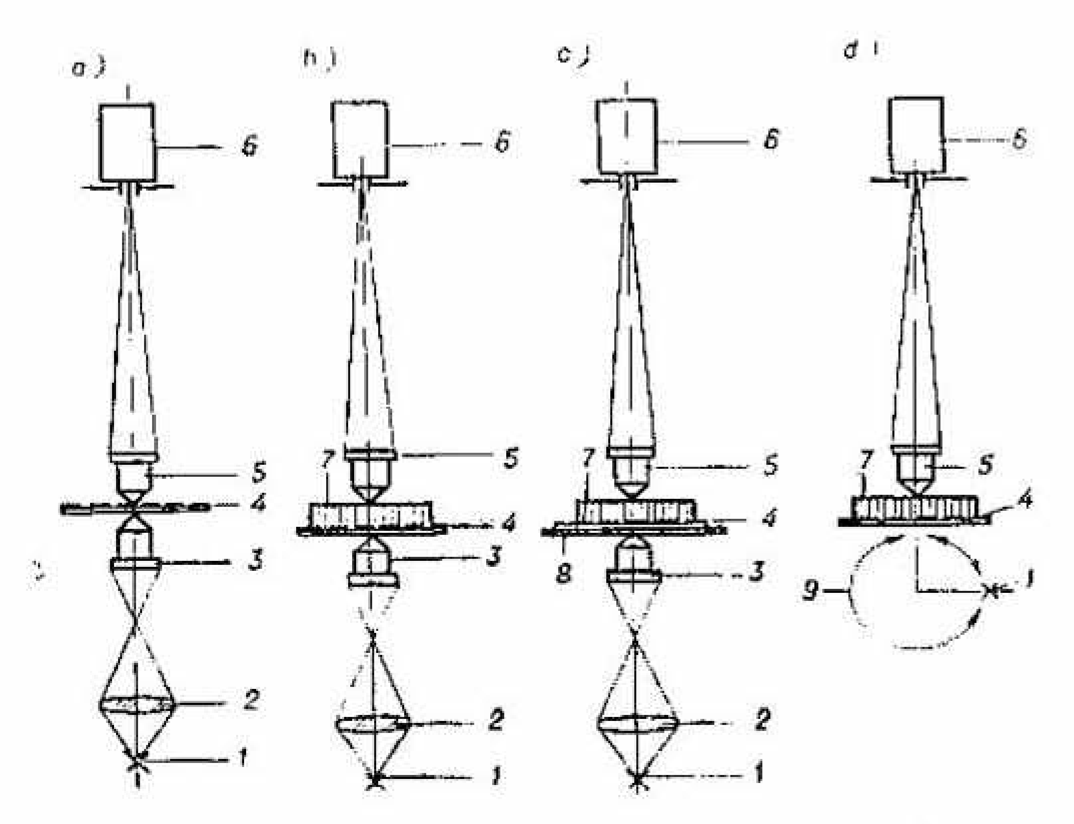


FIG. 46. Esquema de medición del coeficiente de transmisión de contraste de un haz de guías de luz:
1—fuente de luz; 2—condensador; 3, 5—microobjetivos de alumbrado y de recepción; 4—mira; 6—fotomultiplicador con rendija; 7—pieza fibrosa; 8—cristal opalino; 9—esfera fotométrica

el coeficiente de transmisión de contraste del haz de guías de luz y se construye su dependencia de la frecuencia ν de las rayas de la mira (fig. 47). Para determinar el coeficiente de transmisión de contraste en el caso de la iluminación y recepción difusa de la luz, se coloca bajo la mira un cristal opalino (fig. 46, *c*) o una esfera fotométrica (fig. 46, *d*), los cuales dan una radiación difusa, y el flujo saliente se percibe con un microobjetivo de abertura numérica de 0,95—1,0.

Al aumentar la frecuencia de las rayas de la mira, disminuye el coeficiente de transmisión de contraste del haz de guías de luz, y con una frecuencia de ν_n se interrumpe (fig. 47). La frecuencia ν_n de las rayas se denomina poder

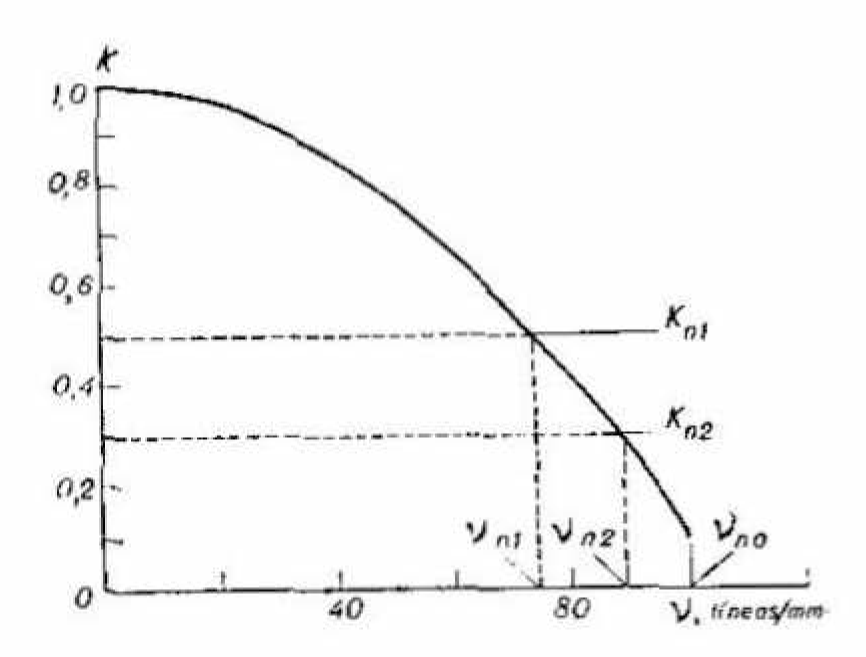


FIG. 47. Dependencia del poder resolutivo ν_n de una pieza fibrosa de la sensibilidad de contraste K_n del receptor de la imagen con la característica de frecuencia—contraste determinada de un haz de guías de luz

resolutivo del haz de guías de luz. De esta manera, el *poder resolutivo* de una pieza fibrosa es la máxima frecuencia resolutiva de las rayas con un determinado contraste, que corresponde al punto límite sobre la curva de dependencia del coeficiente de transmisión de contraste de la frecuencia de las rayas para el haz de guías de luz.

Para medir directamente el poder resolutivo de una pieza fibrosa, con ayuda de un microscopio se examina la imagen de la mira transmitida por la pieza fibrosa fija. Para hacer las mediciones se coloca la mira en contacto con la cara de entrada de la pieza, y sobre la platina del microscopio se pone debajo de la mira un cristal opalino. La frecuencia de las rayas se considera resuelta cuando se pueden ver separadamente las imágenes de las rayas claras y de las oscuras, tales imágenes no tienen interrupciones o desplazamientos y se puede contar su número.

El poder resolutivo del haz de guías de luz depende de la sensibilidad de contraste del receptor de la imagen. Para el ojo, la sensibilidad de contraste se encuentra entre 0,05 y 0,10, por lo cual prácticamente todas las piezas fibrosas resuelven, al examinar la imagen a ojo, una frecuencia ν_{nr}, que es el punto límite sobre la curva de la característica frecuencial y de contraste y que coincide con el valor del poder resolutivo nominal que se calcula por la fórmula (37): $R = (2D)^{-1}$. La frecuencia que puede resolver una pieza fibrosa (o en otras palabras, la que se puede realizar en el aparato), puede variar para otros receptores, por ejemplo, para objetivos y fotomateriales con otra sensibilidad de contraste. Como se ve en la figura 47, cuanto menor sea la sensibilidad del receptor (o sea, cuanto más altos sean los contrastes que puede sentir el receptor) más baja será para él la frecuencia que resuelve la pieza fibrosa. Así, para la característica frecuencial y de contraste de la pieza fibrosa a que se refiere la figura 47, al examinar la imagen a ojo, el poder resolutivo es de 100 líneas/mm; si se utiliza un sistema receptor con una sensibilidad de contraste de 0,30, la resolución posible en el aparato se reduce hasta 88 líneas/mm, y si se registra la imagen por medio de una placa fotográfica con una sensibilidad de contraste de, por ejemplo, 0,50, la frecuencia resolutiva se reduce hasta 74 líneas/mm. En todos los casos, el poder resolutivo nominal del haz de guías de luz $R = (2D)^{-1}$ es mayor que la frecuencia resolutiva del aparato cuando se utiliza un receptor con una sensibilidad menor que la del ojo.

De los razonamientos hechos se deduce que la frecuencia de las rayas que puede resolver el aparato (es decir, el poder resolutivo del sistema haz de guías de luz — receptor de imagen) se puede aumentar elevando el coeficiente de trans-

misión de contraste para las altas frecuencias de las rayas, en particular para el poder resolutivo nominal de la pieza fibrosa. El aumento del coeficiente de transmisión de contraste de los elementos fibrosos para altas frecuencias implica su aumento también para las bajas. Los métodos de elevación del coeficiente de transmisión de contraste de las piezas fibrosas se describen en el § 5 (al examinar el efecto de los tres anillos) y en el § 8.

Factores que determinan el coeficiente de transmisión de contraste de un has de guías de luz. De lo expuesto se desprende que la característica fundamental del haz de guías de luz es la frecuencial y de contraste, la cual describe la imagen transmitida por la pieza fibrosa en términos tanto cualitativos (contraste) como cuantitativos (poder resolutivo). Por esto los especialistas en óptica de las fibras buscan permanentemente métodos para elevar la característica frecuencial y de contraste e investigan los factores que la determinan. Los científicos soviéticos han demostrado que la característica frecuencial y de contraste de una pieza fibrosa depende de un conjunto de factores que, teniendo en cuenta las particularidades de las piezas fibrosas y de sus condiciones de funcionamiento en los sistemas ópticos y óptico-electrónicos, se pueden dividir en cinco grupos:

1) leyes de propagación de la radiación a través de una pieza fibrosa (efecto de los tres anillos);

2) aberraciones estructurales como consecuencia del carácter discreto de la pieza fibrosa como sistema compuesto de un conjunto de filamentos, cada uno de los cuales está rodeado por una envoltura;

3) aberraciones (alteraciones) tecnológicas en la imagen del semiplano, las cuales tienen lugar en las piezas reales a causa de los defectos en los métodos de fabricación;

4) flujo difuso en los microdefectos internos;
5) particularidades de construcción de las piezas fibrosas.

Examinemos por separado cada uno de los factores señalados.

Efecto de los tres anillos. Disminuye el coeficiente de transmisión de contraste de las piezas fibrosas por igual para todas las frecuencias como consecuencia de la redistribución de flujos entre las rayas claras y oscuras en la imagen de la mira. La redistribución de los flujos depende de las aberturas numéricas del sistema que precede a la pieza fibrosa y del de recepción, de la abertura numérica nominal de los guías de luz, del índice de absorción del material de los filamentos y de las envolturas y el coeficiente de relleno de la cara de la pieza por los filamentos. Se puede demostrar que la influencia negativa del efecto de los tres anillos puede reducirse un poco aumentando la relación entre la longitud de la pieza fibrosa y su sección transversal.

La dependencia del coeficiente de transmisión de contraste de una pieza fibrosa del citado grupo de factores se comprueba experimentalmente. En la figura 48 se muestran las características frecuenciales y de contraste de diferentes piezas. Como se puede ver ahí, el coeficiente de transmisión de contraste de una pieza fibrosa con envolturas transparentes aumenta —siendo las demás condiciones iguales— con el crecimiento de A_0 (curvas *2* y *4*) y el aumento del índice de absorción de los materiales de las envolturas aisladoras de luz (curvas *2* y *3*). Pero el aumentar las aberturas numéricas de los sistemas de iluminación y recepción, manteniendo iguales las demás condiciones, disminuye el coeficiente de transmisión de contraste de la pieza en cuestión. Esto se demuestra en el ejemplo de la pieza fibrosa con envolturas transparentes.

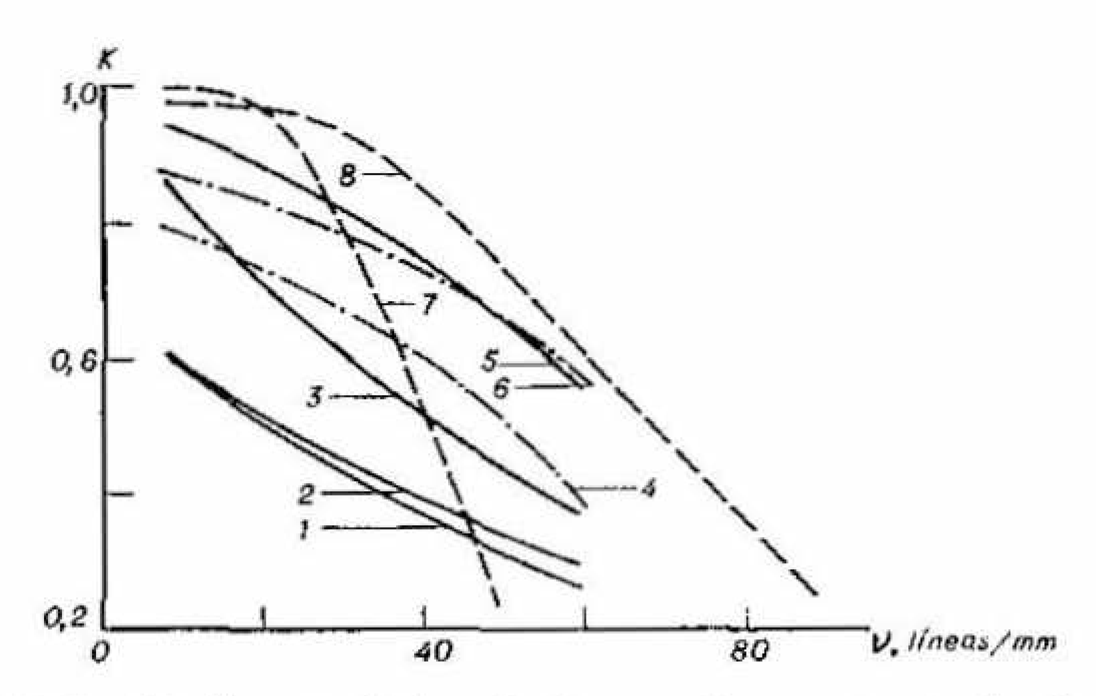


FIG. 48. Características de frecuencia—contraste de elementos fibrosos

— — $A_0 = 0{,}54$; — · — — — $A_0 = 0{,}84$; - - - — $A_0 = 1{,}1$; 2, 3, 5 — $A_1 = 1{,}0$; $A_2 = 0{,}95$; 1 — $A_1 = A_2$ — 1,0; 4 — $A_1 = A_2 = 0{,}65$; 6, 7, 8 — $A_1 = A_2 = 0{,}40$

Aberraciones estructurales. Como consecuencia del carácter discreto de la estructura de la pieza fibrosa y de la simetrización del haz de rayos dentro del filamento, la imagen de, por ejemplo, la frontera de un semiplano, en el caso general aparece quebrada sobre la cara de salida de la pieza fibrosa, distribuyéndose la perturbación de la continuidad en la imagen a las partes oscura y clara en no más del diámetro de un filamento individual. Lo dicho se muestra en la figura 49, donde se presenta esquemáticamente la transmisión de la frontera de un semiplano por piezas de guías de luz monofilares con diferentes formas de sección. La frecuencia del rayado de los filamentos fronterizos es inversamente proporcional a la luminosidad de sus caras de salida.

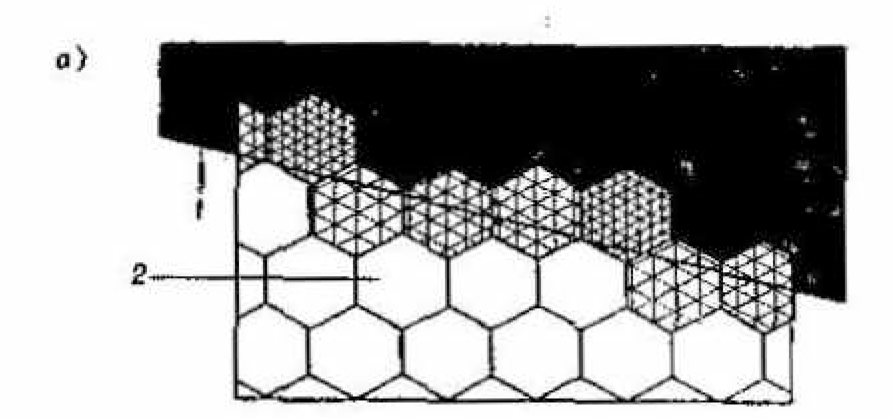
En virtud de las aberraciones estructurales, para una frecuencia ν dada el coeficiente de

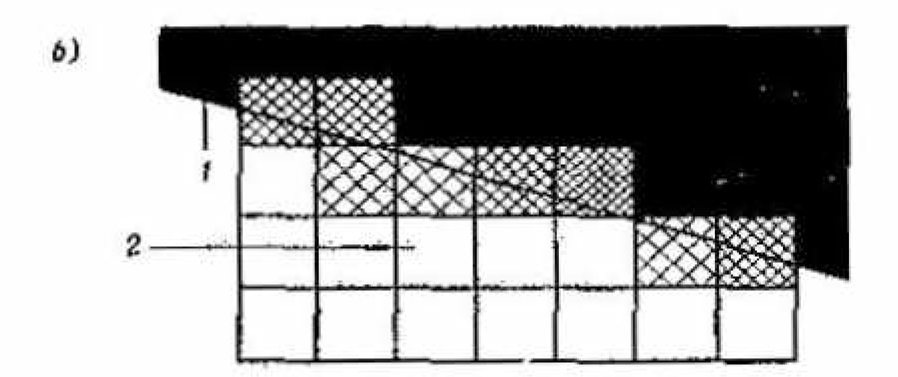
transmisión de contraste depende del diámetro del filamento guía de luz individual y, como se ve en la figura 49, de la forma de sección del filamento y su envoltura, así como del carácter de la disposición de las fibras elementales. Los experimentos y el cálculo muestran que si se toman en cuenta únicamente las aberraciones estructurales, el coeficiente de transmisión de contraste disminuye al aumentar la frecuencia de las rayas y no depende de la longitud de la pieza fibrosa.

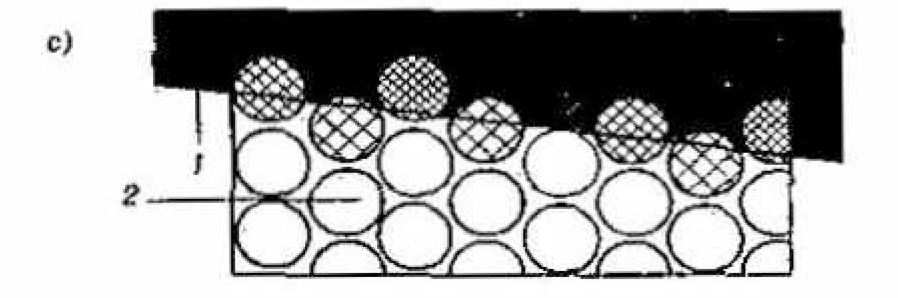
La dependencia del coeficiente de transmisión de contraste en las piezas fibrosas del citado grupo de factores se comprueba experimentalmente. En particular, en la figura 48 se muestran las características frecuenciales y de contraste de dos piezas fibrosas que se diferencian únicamente por el diámetro de los filamentos: la curva 7 corresponde a la pieza con $D_c = 12 \div 4$ µ, la 8 a la pieza con $D_c = 4 \div 5$ µ. Como puede verse, el coeficiente de transmisión de contraste de la pieza de menor diámetro es, por ejemplo, para una frecuencia de 40 líneas/mm un 30% más alto que el de la pieza de mayor diámetro.

Aberraciones tecnológicas. Por causas tecnológicas, las guías de luz multifilares que se utilizan para la fabricación de piezas fibrosas, se distinguen por la sección variable a lo largo de su longitud y por un cierto ángulo de torsión alrededor del eje. Esto conduce a una alteración de la imagen transmitida un poco mayor que la que existe a causa de la estructura apanelada de las piezas y de la finitud del filamento individual. En la imagen de un objeto, la magnitud de estas alteraciones depende de la tecnología de fabricación de las piezas (fig. 50).

Si se toman en cuenta sólo las aberraciones tecnológicas, el coeficiente de transmisión de contraste depende de la magnitud Δl_T de las


a)
1
2


b)
1
2


c)
1
2

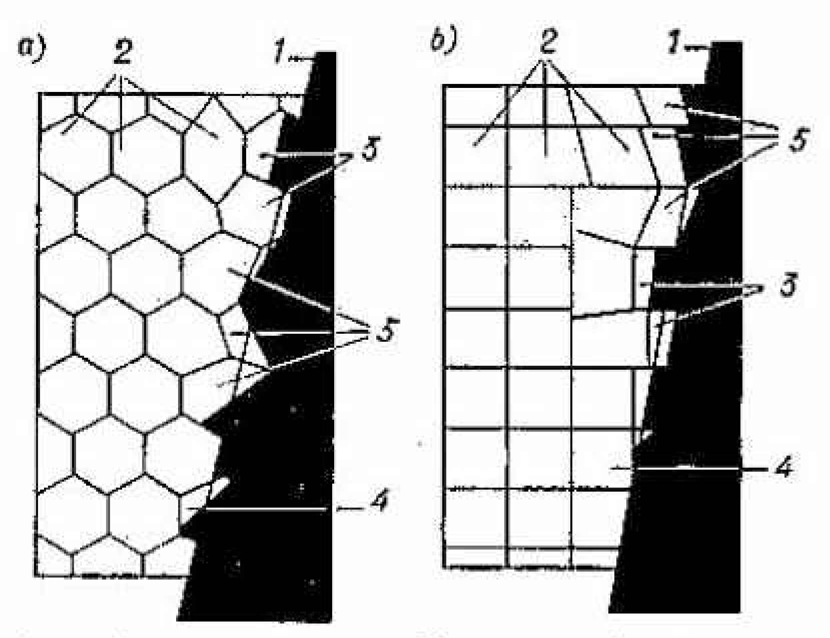


FIG. 50. Alteraciones tecnológicas en la imagen de un semiplano transmitido por una pieza fibrosa de guías de luz multifilares de sección poliedra (*a*) y cuadrada (*b*):

1—frontera real de un semiplano; 2—guías de luz multifilares; 3—desplazamiento paralelo de la frontera; 4—giro de la frontera del semiplano por una guía de luz multifilar enrollada antes del prensado térmico; 5—giro de la frontera de un semiplano por una guía de luz multifilar enrollada durante el prensado térmico

alteraciones introducidas y disminuye con el aumento de la longitud de la pieza fibrosa y de la frecuencia de las rayas. La medición del coeficiente K de transmisión de contraste de una pieza fibrosa para 20 líneas/mm, en tres casos de desplazamiento paralelo de la frontera del semiplano, muestra que si $\Delta l_T = 0$ no hay tal desplazamiento y $K = 0{,}76$; con $\Delta l_T = 6$ μ, o sea un desplazamiento a 0,25 del grosor de la raya, se tiene $K = 70$; cuando el desplazamiento es aproximadamente de la mitad del grosor de la raya, $\Delta l_T = 12$ μ, $K = 0{,}35$.

Flujo difuso. En el interior de la pieza fibrosa ocurre la difusión de la luz en todos los micro-

←——

FIG. 49. Alteraciones estructurales en la imagen de un semiplano transmitido por una pieza fibrosa de guías de luz hexaedras (*a*), cuadradas (*b*) y esféricas (*c*);

1—frontera real de un semiplano; 2—guía de luz elemental (filamento guía de luz en una envoltura aisladora de luz)

defectos posibles del material del filamento y de la envoltura, en las fronteras filamento-envoltura y envoltura-envoltura y en las fronteras entre guís de luz multifilares. La magnitud de la radiación difusa depende de la calidad del material de fabricación (burbujas, partículas de carga no fundida, retorcimientos, etc.) y de los métodos de elaboración de las guías de luz y de la pieza acabada.

El mecanismo de propagación del flujo difuso está sometido a las leyes determinadas por el efecto de los tres anillos. Sobre la cara de salida de la pieza, tal flujo crea un fondo parásito que reduce el contraste de la imagen transformada. El flujo difuso dentro de la pieza se eleva al aumentar la longitud de la guía de luz, como consecuencia del aumento de la longitud del paso del rayo, y al disminuir el diámetro del filamento guía de luz, debido al aumento del número de reflexiones de los rayos. Esto último se explica a causa de la localización de la mayor parte de los defectos tecnológicos interiores de las guías de luz sobre la frontera filamento—envoltura.

Los experimentos muestran que el coeficiente de transmisión de contraste en las piezas fibrosas fabricadas según una tecnología que excluya la penetración entre el filamento y la envoltura de partículas ajenas, manteniendo iguales las demás condiciones, es mayor en un 10 a 15%.

Así pues, si se toma en cuenta sólo el flujo difuso, el coeficiente de transmisión de contraste depende de la calidad de los materiales de fabricación, de la longitud de las guías de luz y del número de reflexiones que experimentan los rayos al propagarse por el filamento guía de luz.

Particularidades de construcción. La característica frecuencia—contraste del haz de guías de luz depende de su construcción y es diferente para las piezas rectas y las curvadas, para ele-

mentos rectos e inversores de la imagen, con caras rectas y con oblicuas, de sección permanente o variable, etc. Así, al transmitir la imagen desde la cara grande a la pequeña, el contraste en los focones es mayor que al transmitir la imagen con aumento. Las piezas fibrosas con caras curvadas tienen una característica frecuencial y de contraste menor que las de caras rectas.

Características de ruido del haz de guías de luz. En los tubos catódicos, por ejemplo en el televisor, la imagen la forma en el luminóforo un haz de electrones por medio de un rápido recorrido (exploración) por líneas de la pantalla. Generalmente el diámetro del haz es pequeño, entre 10 y 200 μ dependiendo de la destinación del tubo catódico. Al emplear en calidad de ventana frontal del tubo catódico una pieza fibrosa, el luminóforo se aplica en la cara de entrada. En estas condiciones, el carácter mosaico de la estructura del haz de guías de luz y sus defectos se convierten en causa de irregularidad de la transmisión de luz en el campo de la pieza fibrosa.

Incluso en el caso de un haz de guías de luz ideal, el carácter mosaico de la estructura, al separar pequeñas partes de su cara iguales en área a unos cuantos filamentos, conduce a que el coeficiente de relleno de tales partes por los filamentos sea distinto, y consecuentemente se diferencie también la transmisión de luz de esas partes.

En resumen, cambia la transmisión de luz a través del campo, lo cual influye también en el coeficiente de transmisión de contraste y en el poder resolutivo locales. La variación de la transmisión de luz local de un haz de guías de luz al explorar su cara de entrada con una pequeña mancha luminosa se denomina *ruido microestructural*. Este ruido constituye una característica objetiva, natural e inevitable de la pieza

fibrosa, y se puede disminuir eligiendo una estructura óptima para el haz de guías de luz; se logra eliminarlo por completo únicamente por medio de la utilización de ciertos métodos que se describen en el § 8. Por lo general, en las piezas fibrosas el ruido microestructural no es muy grande y es igual al $\pm 1,5 - 6\%$, con una frecuencia de aparición de irregularidades de 20-70 mm^{-1}. Semejante magnitud de ruido microestructural no es un obstáculo para la utilización de piezas fibrosas, incluso en tubos catódicos altamente resolutivos.

Al utilizar piezas fibrosas en tubos catódicos, los defectos, es decir, la pérdida local parcial o completa de la transmisión de luz (de algunos filamentos o de sus grupos), constituyen frecuentemente un serio obstáculo puesto que conducen a una fuerte irregularidad tanto del coeficiente de transmisión de contraste como del poder resolutivo a través del campo de la pieza. La variación de la transmisión de luz en el campo de una pieza fibrosa a causa de trozos defectuosos cuando se explora la cara de entrada con una pequeña mancha luminosa, se denomina *ruido macroestructural*; su magnitud, generalmente igual al $10 \div 40\%$, supera notablemente la amplitud del ruido microestructural, pero la frecuencia de aparición cuando se explora es menor y, como regla general, igual a 1—2 mm^{-1}.

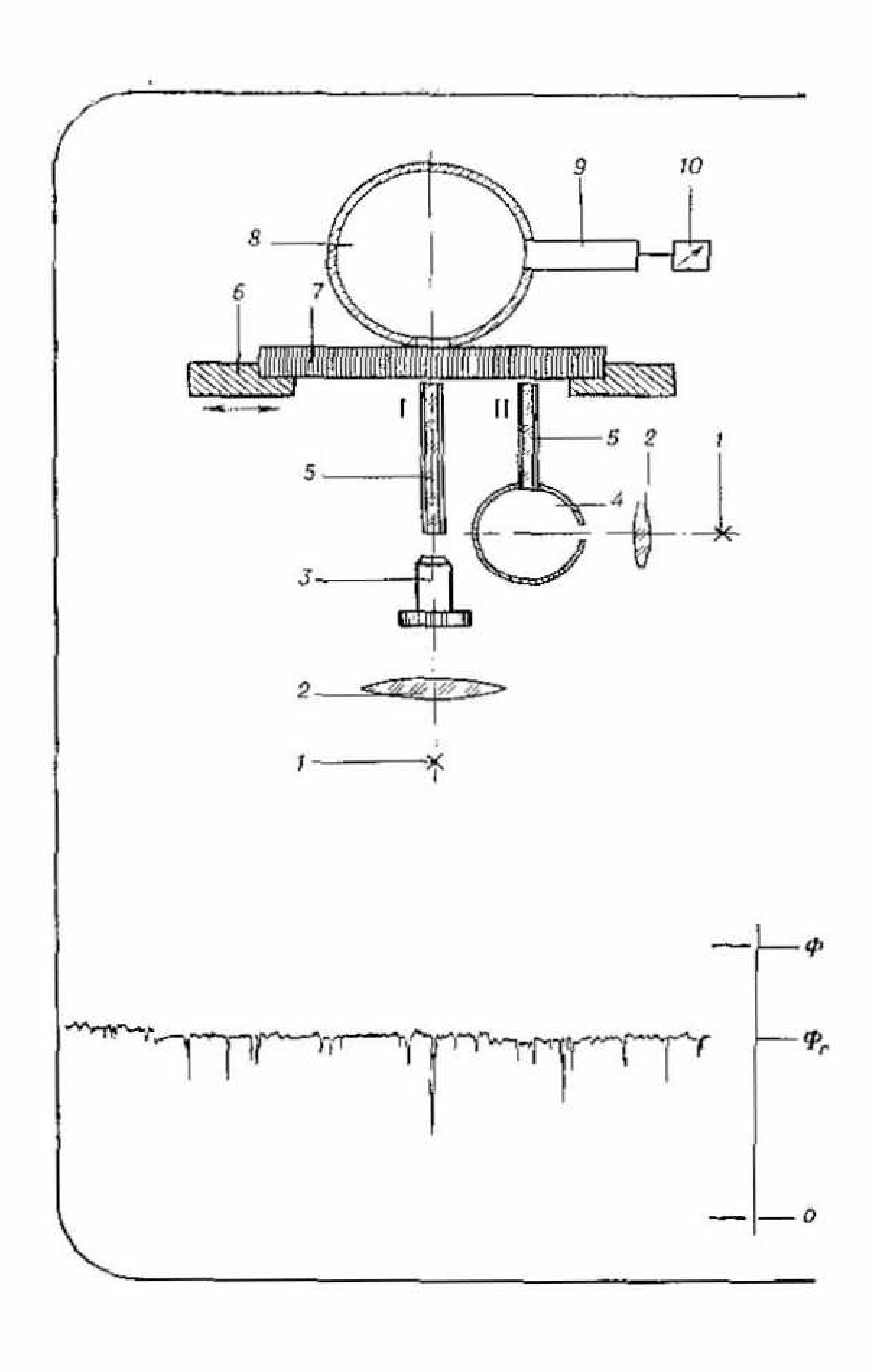
Para medir los ruidos del haz de guías de luz se utiliza un método según el cual la cara de entrada se ilumina con una pequeña mancha luminosa que se forma, por ejemplo, en una guía de luz monofilar (fig. 51); el diámetro de este último puede oscilar entre 5 μ y 3 mm. La cara de entrada del haz de guías de luz se ilumina ya sea por medio de un microobjetivo de abertura determinada (en la fig. 51, *I*), ya sea con una esfera fotométrica (*II*). La abertura de la guía

de luz determina la abertura del haz de rayos que ilumina, y el diámetro de su filamento, el tamaño de la mancha exploradora. La pieza fibrosa se pone en movimiento con relación a la cara de salida del conductor luminoso. El flujo saliente y su variación cuando se explora se miden con un receptor (esfera fotométrica). En la figura 52 se muestra un ejemplo de registro de ruidos en una pieza fibrosa: la amplitud pequeña de la oscilación corresponde al ruido microestructural, mientras que las irrupciones bruscas señalan el ruido macroestructural.

El ruido microestructural sólo se manifiesta en el caso de formación de imagen sobre la cara de entrada del haz de guías de luz por medio de una mancha exploradora luminosa de pequeño diámetro, es decir, el ruido influye en la calidad de la imagen sólo en los tubos catódicos. En los dispositivos óptico-electrónicos y óptico-mecánicos, en donde, como regla general, la imagen sobre la cara de entrada del haz de guías de luz es formada por el haz de rayos (electrónico o luminoso) *al mismo tiempo* en todo el campo, el ruido microestructural no aparece y su influencia negativa sobre la característica frecuencia—contraste del sistema es por lo general insignificante.

El ruido macroestructural se manifiesta en los tres tipos de dispositivos, o sea, en los tubos catódicos, en los convertidores óptico-electrónicos y en los dispositivos óptico-mecánicos. Este ruido origina la reducción local de la característica frecuencial y de contraste, la pérdida de información y confiere a la imagen básica un desorganizado carácter mosaico desagradable a la vista. La defectuosidad de las piezas fibrosas depende de la tecnología de su fabricación y puede ser eliminada por completo.

Correlación de las características ópticas del haz de guías de luz. La transmisión de luz total



9
10
8
6
7
I
II
5
2
1
5
4
3
2
1
Φ
$Φ_r$
0

FIG. 51. Esquema de la medición de los ruidos de piezas fibrosas:

1—fuente de luz; *2*—condensador; *3*—microobjetivo; *4*, *8*—esferas fotométricas; *5*—guía de luz monofilar, *6*—platina; *7*—pieza fibrosa; *9*—fotomultiplicador; *10*—aparato registrador

←——

(en parte también la transmisión de luz del flujo útil), la característica frecuencial y de contraste (y a través de ella el poder resolutivo) y las características de ruido del haz de guías de luz están íntimamente relacionadas entre sí, y, comúnmente, la variación de una de ellas implica inevitablemente el cambio de las demás.

Al utilizar envolturas aisladoras de luz transparentes, como evidencia el efecto de los tres anillos, todos los componentes del flujo (a excepción de Φ^{c}_{u2}) salen del haz de guías de luz; la transmisión de luz total de la pieza es en este caso mayor y la característica frecuencia-contraste menor que cuando se emplean envolturas semitransparentes; es decir, una elevación de la transmisión de luz implica una reducción del coeficiente de transmisión de contraste y a la inversa. Para un haz de guías de luz dado, con parámetros determinados, se puede representar esta correlación en forma de un balancín τ_0 — K que se apoya en el punto O (fig. 53, *a*). La elevación del brazo τ_0 del balancín conduce a la reducción del brazo K y viceversa. Para lograr valores determinados de τ_0 y K es necesario un cambio correspondiente en el material de guías de luz, en la estructura del haz y en la tecnología. A decir verdad, el problema de los tecnólogos de la fibroóptica se reduce al desplazamiento necesario del punto de apoyo O en el balancín τ_0 — K. La práctica demuestra que es posible una posición del punto de apoyo O tal que una

←——

FIG. 52. Ejemplo de registro de los ruidos de una pieza fibrosa en una placa fotográfica

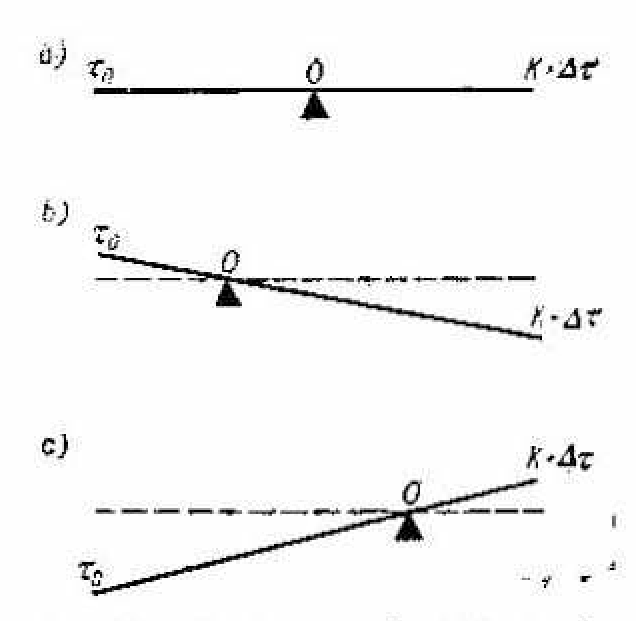


FIG. 53. «Balancín» de la correlación de la transmisión de luz total τ_0, del coeficiente de transmisión de contrasto K y del ruido estructural $\Delta\tau$

pequeña variación de la transmisión de luz τ_0 conduzca a variaciones considerables en el coeficiente de transmisión de contraste K (fig. 53, *b*) o a la inversa (fig. 53, *c*).

La correlación señalada se manifiesta en un grado considerablemente menor entre la transmisión de luz τ_n del flujo útil y el coeficiente de transmisión de contraste, puesto que para un diámetro del filamento y un espesor de la envoltura dados, el aumento de la densidad óptica ($D = -\lg \tau$) del material de la envoltura desde 0 hasta 0,3 —siendo el grosor de la pieza fibrosa por del eje de las guías de luz de unos 5 a 10 mm— casi no reduce τ_n. Esto último se explica en razón de que para longitudes tan pequeñas (pero típicas en la construcción de aparatos) de los filamentos, son pequeñas también las pérdidas por reflexiones internas que están ligadas con la disminución de la transparencia del material de las envolturas. Lo dicho se comprueba con los datos del experimento que aparecen en la tabla 5.

Cuanto más transparente sea el material de la envoltura, tanto mayor será la magnitud del flujo que sale a través de sus topes (es decir la suma de los componentes Φ_u^u y Φ_b^u), o sea, tanto menor será la diferencia en luminosidad de las caras de entrada de filamentos y envolturas, y por consiguiente, tanto menor es el ruido microestructural. Por otra parte, al aumentar la absorción de luz (densidad óptica) de las envolturas, crece el coeficiente de transmisión de contraste y disminuye la transmisión de luz total; además, aumenta la diferencia en la luminosidad de las caras de salida de filamentos y envolturas, es decir, crece el ruido microestructural, como se ve en la tabla 5. Así pues, una disminución de la

Tabla 5

Transmisión de luz y coeficiente de transmisión del contraste del haz de guías de luz

Densidad óptica de la envoltura	τ_0 en %	τ_n en %	K con 25 líneas/mm	Ruido en %
0,02	80	56	0,50	±1,5
0,08	70	56	0,70	±3
0,13	62	55	0,83	±5
0,30	55	52	0,91	±7

transmisión de luz total en el haz de guías de luz implica un aumento de la característica frecuencia-contraste y del ruido microestructural. Al utilizar el método de la figura 46 para medir el coeficiente de transmisión de contraste de las piezas fibrosas, estrictamente hablando, había que transformar los resultados del experimento según la fórmula

$$m_\nu = \frac{(E_{\text{máx}} \pm \Delta E_{\text{máx}}) - (E_{\text{mín}} \pm \Delta E_{\text{mín}})}{(E_{\text{máx}} \pm \Delta E_{\text{máx}}) + (E_{\text{mín}} \pm \Delta E_{\text{mín}})}, \quad (45)$$

donde $\Delta E_{\text{máx}}$ y $\Delta E_{\text{mín}}$ son las variaciones locales

de luminosidad en la superficie de las rayas clara y oscura de la mira, es decir, las amplitudes del ruido microestructural. En la práctica los resultados de los experimentos se procesan por las fórmulas (43) y (44), para lo cual se emplean las rayas largas de la mira y una rendija receptora larga con el fin de homogenizar la influencia del ruido microestructural sobre la superficie de las rayas. De la fórmula (45) se desprende que el ruido microestructural está ligado con el coeficiente de transmisión de contraste.

Al diseñar elementos y dispositivos fibroópticos en base a las tres características ópticas fundamentales del haz de guías de luz (la transmisión de luz total, la característica frecuencial y de contraste y el ruido microestructural), es necesario tener en cuenta la interconexión estrechísima y objetiva que existe entre ellas.

Características ópticas de los manojos de piezas fibrosas. En muchos tipos de dispositivos óptico-mecánicos, óptico-electrónicos y electrónico-ópticos, se emplean varias piezas fibrosas colocadas en el instrumento sucesivamente una tras otra y unidas entre sí o directamente, o bien a través de elementos de óptica luminosa o electrónica. Como ejemplo puede servir el convertidor de tres cámaras óptico-electrónico, el cual contiene seis elementos fibrosos. En tales dispositivos, las piezas fibrosas forman un manojo, cuyas características ópticas se diferencian de los parámetros de la pieza fibrosa individual.

La transmisión de luz T_m de un manojo de k piezas luminosas se determina multiplicando sus coeficientes de transmisión de luz:

$$T_m = T_1 T_2 T_3 \ldots T_k. \qquad (46)$$

La transmisión de luz total, como se ve en esta fórmula, de seis piezas fibrosas (si la de cada una es 0,62) será $(0{,}62)^6 = 0{,}09$, es decir, menos del

10%. Reduciendo las pérdidas por reflexión en las caras de los filamentos (por ejemplo, con ayuda de recubrimientos clarificantes y de capas de inmersión) se puede aumentar la transmisión de luz total del manojo de piezas fibrosas.

El coeficiente K_{vc} de transmisión de contraste del manojo de piezas fibrosas es igual al producto de los coeficientes individuales para una frecuencia dada de las rayas de la mira:

$$K_{vc} = K_1 K_2 K_3 \ldots K_k. \qquad (47)$$

De aquí se deduce que el coeficiente total de transmisión de contraste de un manojo de seis piezas fibrosas (si en la frecuencia dada cada una tiene $K_1 = 0.85$), será $(0,85)^6 = 0,38$, o sea, en este caso el manojo de seis piezas tiene un coeficiente de transmisión de contraste de casi la mitad del de una pieza individual. Al disminuir el K_1 de cada pieza crece la velocidad de reducción del K_{vc} total.

Se acostumbra determinar el poder resolutivo R_m del manojo de piezas fibrosas por la fórmula

$$\frac{1}{R_m^2} = \frac{1}{R_1^2} + \frac{1}{R_2^2} + \frac{1}{R_3^2} + \ldots + \frac{1}{R_k^2}. \qquad (48)$$

Si los poderes resolutivos de todas las piezas son iguales y tienen un valor de R_1, la expresión(48) se simplifica: $R_m = \frac{R_1}{\sqrt{k}}$. Por ejemplo, si en un manojo de seis piezas $R_1 = 80$ lín/mm, según la fórmula (48) la resolución total del manojo será de sólo $R_m = \frac{R_1}{\sqrt{k}} = 33$ lín/mm.

Sin embargo, como muestran investigaciones realizadas por científicos soviéticos, el poder resolutivo de un manojo de seis piezas fibrosas con una abertura numérica nominal de 1, por ejemplo, es de 56 y no de 33 líneas/mm. Las investigaciones demuestran que la utilización simultánea de las fórmulas (47) y (48) es incorrec-

ta, ya que la expresión (47) es objetiva tanto para la determinación de la característica frecuencial y de contraste del manojo de piezas fibrosas como para la determinación de su poder resolutivo como punto límite sobre la curva de la característica frecuencial y de contraste. En efecto, si para una frecuencia de 56 líneas/mm una pieza fibrosa con poder resolutivo de 80 líneas/mm tiene un coeficiente de transmisión de contraste de 0,70, entonces en un manojo de seis piezas semejantes $K = 0{,}12$, o sea, el contraste y, correspondientemente, la frecuencia de las rayas son perfectamente distinguibles por el ojo. Las investigaciones experimentales demuestran que la fórmula (48) puede ser utilizada si una frecuencia de las rayas de $\nu = R$, proporciona un contraste de la imagen que supera la sensibilidad de contraste del receptor de la misma. También en este caso, no obstante, todos los resultados del cálculo divergen sustancialmente del experimento.

Por eso para un manojo de piezas fibrosas hay que emplear solamente la fórmula (47).

Las características de ruido del manojo de piezas fibrosas son diferentes para los ruidos microestructural y macroestructural. El ruido microestructural disminuye al aumentar el número de piezas en el manojo: ocurre una especie de «aplanamiento» de la estructura. Es de señalar que una disminución del coeficiente total de transmisión de contraste en un manojo de haces de guías de luz también va acompañada de una redución del ruido microestructural.

Con el aumento del número de piezas en el manojo, el ruido macroestructural se aumenta tanto en amplitud como en frecuencia de aparición. Esto último se explica en razón de que el carácter mosaico y los defectos de cada pieza fibrosa precedente se transmiten a la entrada de la

siguiente y, como resultado, pasan a la salida del manojo mismo con amplitud aumentada. Pero como la distribución de ellas es desordenada, entonces crece también la frecuencia de su aparición. Por eso, mientras más piezas fibrosas unidas sucesivamente haya en el dispositivo, más rigurosas y elevadas serán las exigencias que se le hacen a la ausencia del carácter mosaico y defectos de la estructura en cada pieza individual.

Transmisión de una imagen por un haz de guías de onda. La imagen puede transmitirse a través de un haz de guías de onda, pero (a causa de la pequeñez de los diámetros de los filamentos guías de luz —del orden de 0,1 a 2 μ— y de la inadmisibilidad de disminuir el espesor de las envolturas aisladoras de luz hasta un grosor menor que la longitud de onda de la radiación transmitida) el coeficiente de relleno de la cara por los filamentos es pequeño. Por eso también el coeficiente de transmisión de contraste del haz de guías de onda es muy bajo, además el grado de su reducción es considerablemente mayor que en el haz de guías de luz al aumentar la frecuencia de las rayas. El efecto de los tres anillos se observa también en el haz de guías de onda en forma modificada, sin embargo los rayos de cada componente (entre ellos de Φ_n) salen del haz de guías de onda fuertemente difusos, a pesar de que la mayor parte de ellos sale en direcciones determinadas por el efecto de los tres anillos.

Sobre la cara de salida del haz de guías de onda, el cuadro «ondular» dificulta la observación y el análisis de la imagen cuando las frecuencias de las rayas son cercanas a la resolución nominal de las piezas fibrosas, $R = (2D)^{-1}$. La información se transmite a través de los canales ondulares en forma de diferentes tipos de modos, pero a duras penas se le puede llamar óptica en el sentido habitual de la palabra.

CLASIFICACIÓN DE LOS ELEMENTOS FIBROSOS Y PRINCIPIOS DE SU APLICACIÓN

4

En la fibroóptica hasta el momento están en consideración las cuestiones relacionadas con los *principios generales* de aplicación de los elementos fibrosos en la fabricación de instrumentos y los *parámetros logrados* por los sistemas de conducción de la luz aplicables a los instrumentos, o sea, los aceptables para resolver un problema dado junto con otros sistemas ópticos y electronoópticos. Las investigaciones incompletas a este respecto se deben entre otras causas a la inexistencia de una clasificación de los elementos fibrosos. La gran diversidad de estos últimos por su construcción, flexibilidad, régimen de trabajo en el instrumento, transparencia en determinada región del espectro de radiación, los materiales

empleados, aplicación, hermeticidad y otros parámetros más, dificulta la realización de una clasificación exacta.

Existe también cierta dificultad para realizar esta clasificación debido a que en cualquier sistema se puede encontrar una pieza fibrosa, es posible que puede ser clasificada en dos tipos a la vez.

Clasificación de los elementos fibrosos. Los artículos fibrosos para un parámetro característico dado se pueden dividir en rígidos y flexibles, monofilares y multifilares, selectivos y neutrales a la transmisión de luz regulares e irregulares, aplicables en régimen estático y aplicables en régimen dinámico, con la sección constante o variable por la longitud, de vidrio y polímeros, no vacuoherméticos y herméticos, etc. Los problemas fundamentales que se pueden resolver a base de la fibroóptica son los siguientes:

transmisión a distancia de una señal luminosa;

transmisión a distancia de una imagen óptica o óptico-electrónica;

reconstrucción de la forma de una señal luminosa;

transformación de una imagen óptica.

Los elementos fibrosos se emplean para determinada transformación (transmisión y reconstrucción) de la información óptica (organizada o no organizada) y esto es su aplicación en la construcción de instrumentos. Tomamos como base de la siguiente clasificación el conjunto de problemas ópticos que pueden ser resueltos por determinado artículo fibroso. En este caso se distinguen claramente diez tipos de elementos fibrosos.

La clasificación propuesta abarca prácticamente todos los tipos de elementos fibrosos, pero no está libre de insuficiencias. Así, por ejemplo, de acuerdo con el conjunto de problemas que pue-

Tabla 6

Clasificación de elementos fibrosos y ejemplos de su utilización

Clase	Destinación o característica	Ejemplos de elementos fibrosos	Ejemplos de instrumentos	Difusión aproximada en la fabricación de instrumentos de los elementos de cada clase, en %
Primera	Transmisión de luz a distancia (información desorganizada)	Haces de fibras flexibles con distribución irregular	Gastroscopios y laringoscopios para medicina; diferentes equipos para la transmisión de señal de referencia	6
Segunda	Transmisión a distancia de la imagen óptica (información organizada)	Haces regulares de fibras flexibles	Endoscopios para medicina e industriales	3
Tercera	Transformación de la forma geométrica de una señal luminosa (información desorganizada)	Polimechas fibrosas flexibles	Colectores luminotécnicos y distribuidores de radiación, analizadores de imagen	Más de 60
Cuarta	Transformación de la imagen óptica (información organizada)	Conductos de luz focones doblados para la inversión total de la imagen	Laringoscopios para medicina	Más de 14

Quinta	Selección de radiación de determinado intervalo de longitudes de ondas	Discos fibroópticos densos para vacío, transparentes a rangos ultravioletas del espectro	Tubos de rayos catódicos, vidicones para la televisión a colores	2
Sexta	Capacidad de transformar un espectro o amplificar la señal de entrada	Placas policanales activadas	Transductores optoelectrónicos empleados en la transformación y amplificación del brillo de la imagen	5
Séptima	Mejoramiento de los parámetros técnicos de los instrumentos a base de la utilización en régimen dinámico	Haz de fibras libres, un extremo del cual está formado por un bloque compacto	Analizadores optoacústicos (septrones)	
Octava	Observación y formación de la imagen (óptica de láminas)	Foclines	Sistemas lectores reproductores de sonido en los fonogramas fotográficos de proyección de cine	Menos de 1
Novena	Formación independiente de la imagen	Conductos de luz de autoenfoque (selfocos)	Instrumentos para medicina	
Décima	Transmisión a distancia de información luminosa en forma de tipos de ondas (modos)	Guías de ondas	Líneas de telecomunicaciones ópticas	

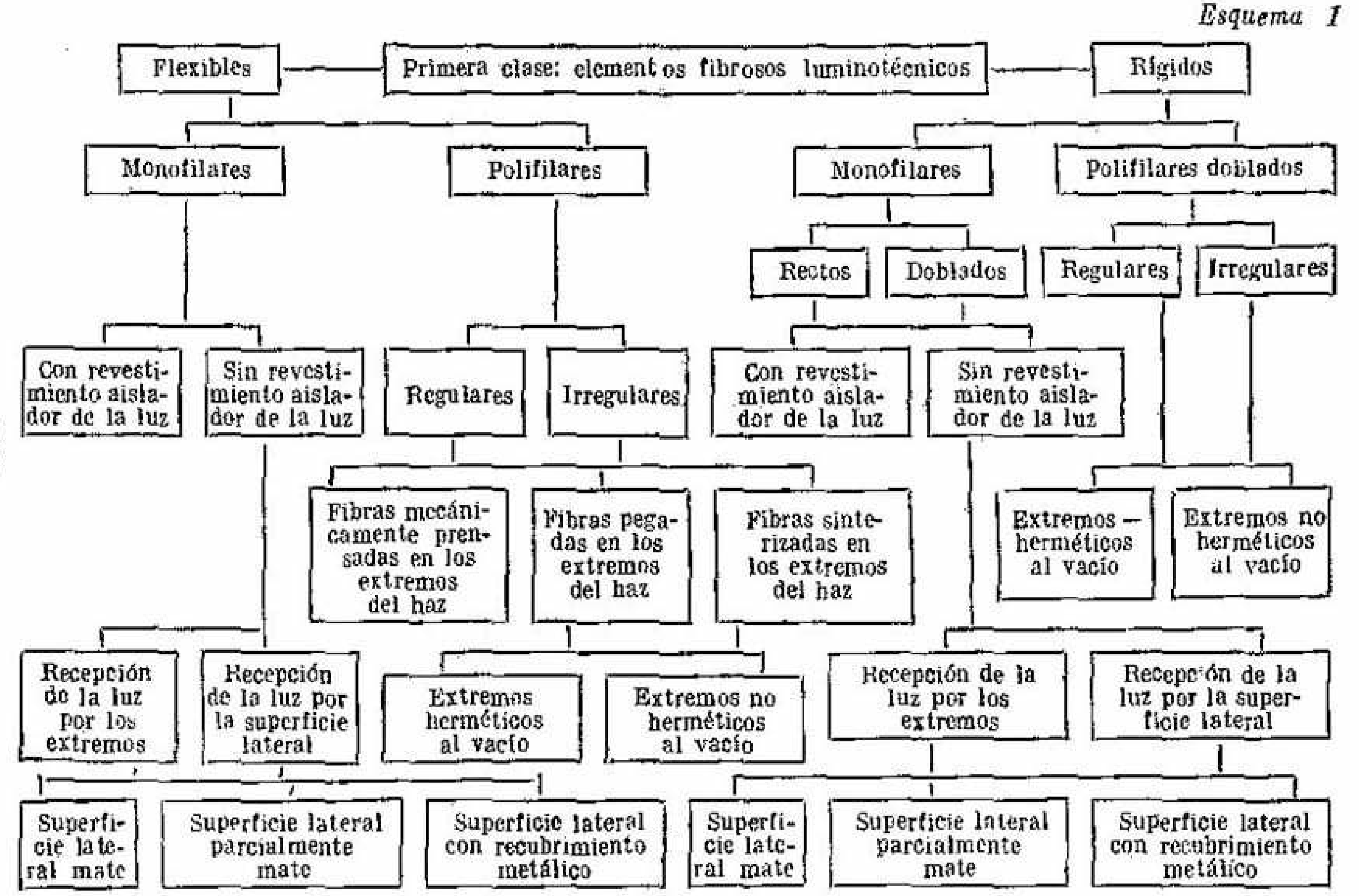
den resolver, los elementos del quinto tipo se pueden situar en una de las primeras cuatro clases. Muchas clases de elementos fibrosos pueden resolver varios problemas a la vez, como por ejemplo, la transmisión de la imagen a distancia con la variación de la escala y la corrección de la curvatura del campo de los sistemas anteriores y posteriores. La clasificación dada puede ser más correcta si entre las cuatro primeras clases se sitúan los artículos fibrosos transparentes sólo en el espectro visible de la luz. Esta clasificación en la etapa actual del desarrollo de la fibroóptica es la más aceptable. Por lo menos las cuatro primeras clases de elementos fibrosos se diferencian actualmente de las últimas seis clases por una aplicación más amplia y variada en la fabricación de instrumentos que los elementos de las últimas seis clases.

En la tabla 6 se dan ejemplos de aplicación de los elementos fibrosos de diferentes clases en la fabricación de instrumentos. La difusión aproximada de los elementos fibrosos de cada clase dada en la tabla 6, corresponde al período entre los años 1971—1972. Es posible que estos datos en el futuro varíen y se verifiquen.

Más abajo están dispuestas diferentes clases de elementos fibrosos, vienen dadas las peculiaridades de sus construcciones, los principios básicos de utilización y algunos ejemplos de instrumentos a base de sistemas de conductos de luz.

10. PRIMERA CLASE: ELEMENTOS FIBROSOS LUMINOTECNICOS

Los elementos fibrosos de la primera clase están destinados a la transmisión de la señal luminosa en forma de información desorganizada (en general no óptica) a distancia, por medio de canales rígido o flexible, recto o curvo (esquema 1).


Esquema 1
Primera clase: elementos fibrosos luminotécnicos
Flexibles
Rígidos
Monofilares
Polifilares
Monofilares
Polifilares doblados
Rectos
Doblados
Regulares
Irregulares
Con revestimiento aislador de la luz
Sin revestimiento aislador de la luz
Regulares
Irregulares
Con revestimiento aislador de la luz
Sin revestimiento aislador de la luz
Fibras mecánicamente prensadas en los extremos del haz
Fibras pegadas en los extremos del haz
Fibras sinterizadas en los extremos del haz
Extremos — herméticos al vacío
Extremos no herméticos al vacío
Recepción de la luz por los extremos
Recepción de la luz por la superficie lateral
Extremos herméticos al vacío
Extremos no herméticos al vacío
Recepción de la luz por los extremos
Recepción de la luz por la superficie lateral
Superficie lateral mate
Superficie lateral parcialmente mate
Superficie lateral con recubrimiento metálico
Superficie lateral mate
Superficie lateral parcialmente mate
Superficie lateral con recubrimiento metálico

Como se puede observar en la tabla 6, la difusión de este tipo de elementos es cerca del 6% de todo el conjunto de sistemas de conductos de luz aplicables. En la fabricación de instrumentos siempre ha existido la necesidad de transmitir una información luminosa de un punto a otro, distanciados éstos por elementos complejos de la construcción, lo que ha permitido sólo el empleo de tubillos curvos de transmisión luminosa. *En principio*, este problema se puede resolver con ayuda de la óptica clásica; sin embargo, no es fácil hacerlo a causa de las limitaciones volumétricas de los instrumentos y la dificultad de construir un tubillo luminoso curvo. El problema general es prácticamente insoluble cuando se trata de la variación constante de la curvatura del canal luminoso y requiere que éste posee una alta luminosidad. Los transmisores luminosos de la fibroóptica permiten en forma simple resolver este problema, con las ventajas de una construcción compacta del instrumento y la transmisión a distancia de los flujos luminosos con aberturas muy altas para trayectorias de curvaturas complejísimas variables inclusive durante el empleo del instrumento.

Como regla general, los elementos de la clase dada deben transmitir haces de rayos con aperturas numéricas altas, en la mayoría de los casos entre 0,5—0,87, rara vez 1,0. Si un conducto de luz o una fibra se incluye en un instrumento directamente *es obligatoria* la construcción monofilar. En este caso, el relleno seccional de filamentos es $\sim\tau_5 = 1$, lo que permite un grado más alto de transmisión luminosa quo en el caso de un conducto de luz polifilar.

Elementos polifilares transmisores de luz. La abertura numérica sen u de un conducto de luz monofilar con un diametro de filamento $2r_c$ y doblado circunferencialmente con un radio R,

disminuye al aumentar el diámetro $2r_c$ del filamento y al disminuir el radio de curvatura R según esta expresión:

$$\operatorname{sen} u = \sqrt{n_c^2 - \left(\frac{1 + \frac{r_c}{R}}{1 - \frac{r_c}{R}} \right)^2 n_u^2} < \sqrt{n_c^2 - n_u^2}. \quad (49)$$

Si la fibra o el conducto de luz se emplean en un instrumento en forma doblada, de tal manera que el radio R de curvatura sea pequeño, puede ocurrir que la abertura numérica de este conducto de luz resulte menor que la abertura numérica del haz de rayos incidente, o sea, la transmisión de luz τ_1 será menor que 1. Hasta determinados límites estas pérdidas se pueden despreciar para algunos aparatos, sin embargo, para R muy pequeños ya son significativas. En este caso, se emplean fibras polifilares o conductos de luz, con lo cual se logra una gran disminución de r_c de cada filamento para un mismo R, es decir, un aumento tan considerable de la abertura numérica del haz en comparación con su construcción monofilar. Para las construcciones polifilares el relleno seccional de toda la espiga es $\tau_5 < 1$, pero generalmente las pérdidas son menores que la disminución de la transmisión de luz por una disminución de la abertura numérica de los conductos de luz. La compensación de algunas pérdidas como, por ejemplo, la disminución de τ_5, a causa de la disminución de otras, como, por ejemplo, el aumento de τ_1, generalmente es fácil de calcular y se determina para cada instrumento dado. *Solamente* por la dependencia entre la abertura numérica del conducto de luz y la relación entre el radio de su filamento y el radio de curvatura se explica la aplicación de las construcciones polifilares en los elementos fi-

brosos de la primera clase. En este caso, si no se exige una gran compacidad del haz (rígido o flexible), se emplean generalmente haces con distribución irregular; en caso contrario se emplean sólo regulares.

Papel de la abertura nominal. Como se puede observar en la fórmula (49), la abertura numérica de un conducto de luz curvo depende de r_c y R y aumenta con el aumento del coeficiente de refracción n_c del filamento y con la disminución del índice de refracción n_u del revestimiento, o sea, es directamente proporcional a la abertura numérica nominal $\sqrt{n_c^2 - n_u^2}$ del conducto de luz. Por este motivo es importante tener aberturas nominales altas de los conductos de luz cuando se tienen fibras o haces de fibras muy dobladas. Cuanto mayor sea $A_0 = \sqrt{n_c^2 - n_u^2}$ tanto mas se puede curvar el conducto de luz para un radio dado r_c del filamento, o para un radio dado R de curvatura se pueden emplear filamentos más gruesos (y con esto aumentar τ_5) disminuyendo insignificantemente la abertura del conducto de luz hasta, por ejemplo, el valor tolerable.

Condiciones de utilización de los conductos de luz y su flexibilidad. Las fibras y haces flexibles se emplean cuando el elemento transmisor de luz debe estar en continuo movimiento: cuando varía el carácter de la trayectoria y la curvatura en tramos dados, cuando hay una variación de la distancia directa geométrica mínima desde la cara de entrada hasta la de salida y el grado de torsión del canal alrededor de su eje.

Los conductos de luz y los haces rígidos se emplean cuando es necesario un canal transmisor de luz con curvatura constante, rígida y además compleja.

Veamos algunos principios y ejemplos de elementos fibrosos de la primera clase.

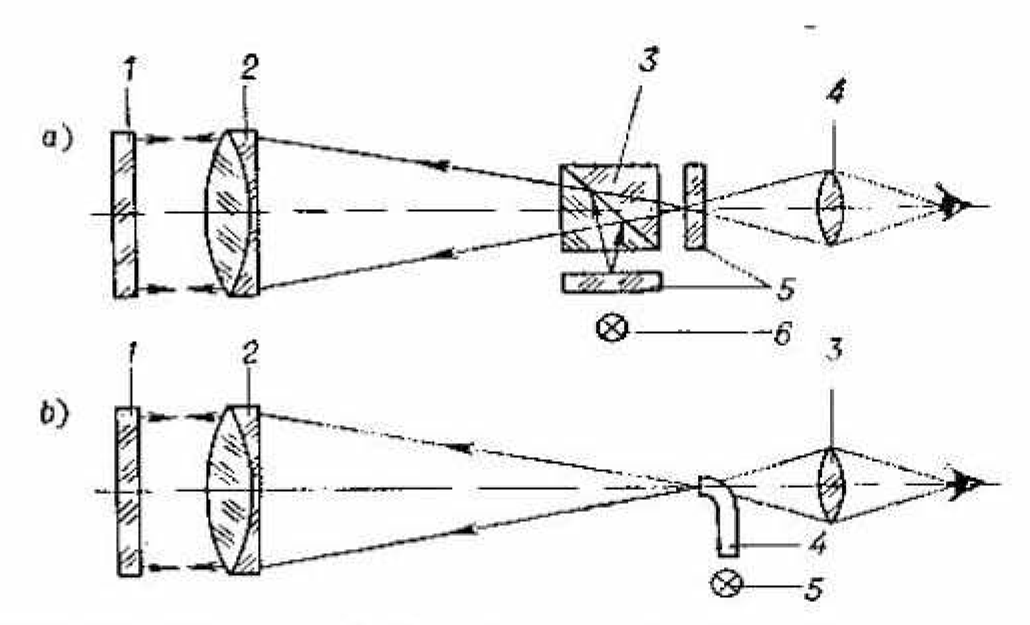


FIG. 54. Esquema óptico de un autocolimador: *a* — con un cubo y dos placas; *b* — con una fibra monofilar combada

Simulación de una fuente puntual de luz y de un receptor puntual de radiación. En la fig. 54,*a* se representa el esquema de un *autocolimador* clásico: la cruz trazada en el fondo oscuro de una placa horizontal *5* e iluminada por una fuente *6*, envía un flujo luminoso en dirección a un cubo *3* divisor de luz; de éste, parte de los rayos se refleja en dirección al objetivo *2* y después va como un haz paralelo hasta el espejo *1*. Esto se cumple cuando la cruz se encuentra en el plano focal del objetivo. La luz reflejada por el espejo *1*, después de atravesar el objetivo y el cubo, forma la imagen de la cruz en el plano de la placa vertical *5*, la cual debe también encontrarse justo en el plano focal del objetivo. Si el espejo *1* se halla en posición justamente perpendicular al eje óptico del autocolimador, entonces la imagen de la cruz horizontal coincide con la cruz-marca en la placa vertical.

En forma análoga funciona el autocolimador de fibra óptica (fig. 54, *b*). La bombilla *5* ilumina la fibra curva monofilar *4* de diámetro de 5 a 15 μ,

iluminada por una lámpara *5*, envía a través de su cara de salida (fuente puntual de luz) un haz de rayos, divergente cónico al objetivo *2*; los rayos se reflejan por el espejo *1* y regresan a la fuente de luz, o sea, a la cara de salida de la fibra. Si esta cara se encuentra en el plano focal del objetivo *2* y el espejo *1* está perpendicular al eje óptico del sistema, la imagen de la cara de salida coincide exactamente con la misma cara. Esta coincidencia se establece fácilmente por medio del ocular *3* al desaparecer una mancha luminosa brillante. El empleo del simulador fibroso de la fuente puntual aumentó la exactitud del autocolimador, simplificó mucho su alineación y estructura.

La fibra monofilar en calidad de pluma luminosa (análoga a una pluma corriente con tinta) se emplea para escribir en la oscuridad sobre papel fotosensible y también para la fotograbación latente. La pluma luminosa al recorrer la superficie de la matriz compuesta de un conjunto de receptores fotosensibles, comunica la información codificada a través de la velocidad y el carácter de la trayectoria de movimiento de la pluma luminosa y además a través de la amplitud del flujo luminoso, que pasa por la fibra en un momento dado. La información codificada enviada por las células fotosensibles es transferida al analizador general de la información.

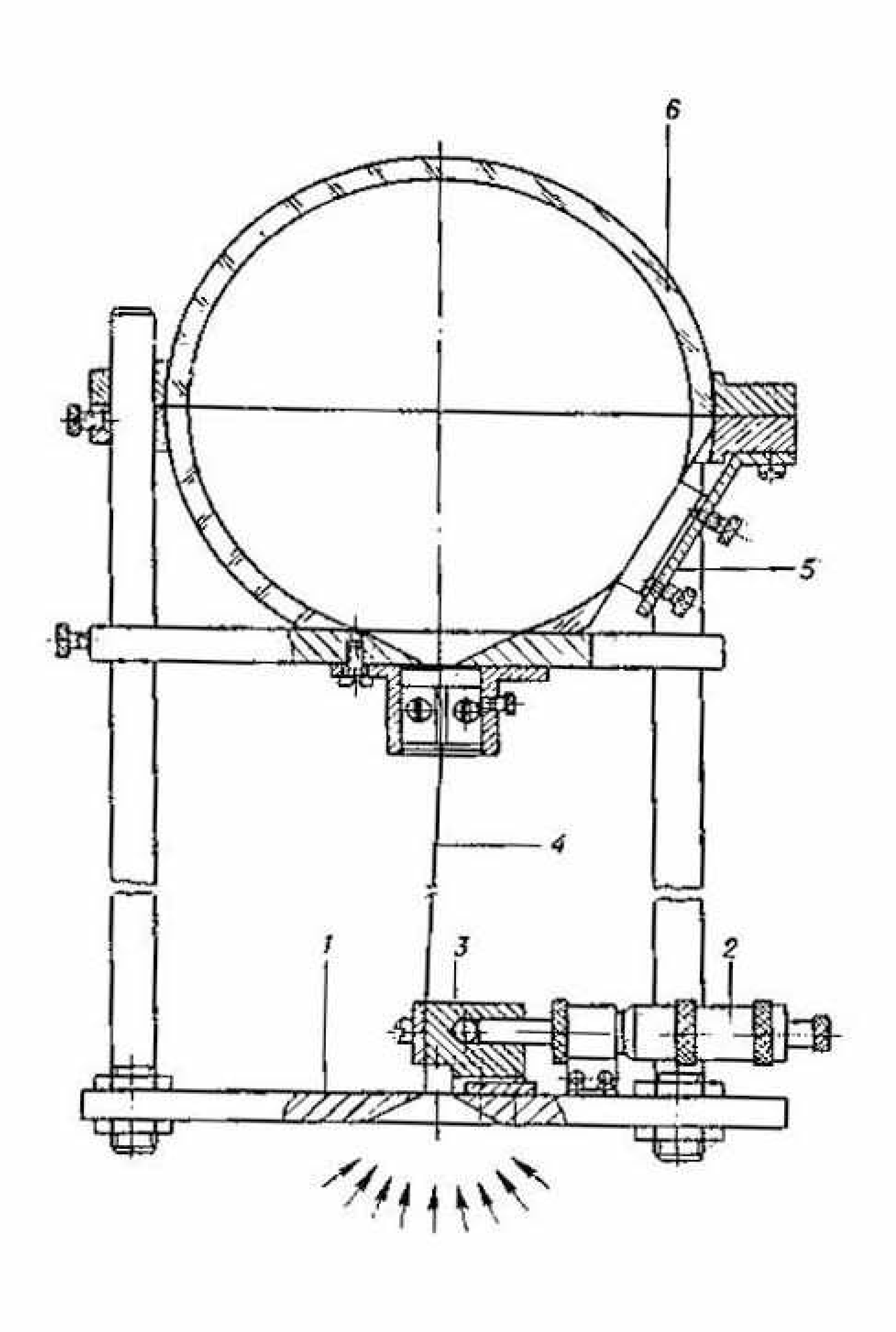
Las fibras y los conductos de luz monofilares se emplean para nivelar la luminosidad por la superficie de la mancha luminosa igual o coincidente con la cara de salida de aquéllos.

Sonda de pruebas luminosa. Durante la realización de diferentes tipos de experimentos con los campos luminosos son necesarios receptores de radiación capaces de medir la irradiación en áreas del orden de décimas y milésimas de milímetro sin influir sobre el campo luminoso.

Antes del descubrimiento de los métodos de la fibroóptica, semejantes investigaciones quedaban, en la mayoría de los casos, irrealizables. Ahora, con ayuda de las fibras ópticas de diámetro entre 5 y 300 μ, se realizan prácticamente investigaciones microscópicas de los campos luminosos. La sonda de pruebas luminosa en forma de microsonda de fibras penetra cada vez más en los aparatos fotométricos. En la fig. 55 se muestra el esquema de un microfotómetro de fibras para la medición de la distribución de la iluminación en la mancha focal de los concentradores de los rayos solares. En el plano focal del espejo está montado un disco *1* con un mecanismo micrométrico *2* que desplaza, con ayuda de un soporte *3*, en el campo luminoso investigado, la cara de entrada de la fibra monofilar *4*. La cara de salida de la fibra se introduce en la esfera fotométrica *6*, en conexión con una termopila *5*.

La fibra óptica unitaria ha resultado ser una sonda de prueba luminosa de alta efectividad. Tiene una gran flexibilidad, su transmisión de luz (si la abertura numérica es más de 0,95) prácticamente no varía con curvaturas de la fibra tolerables (sin destrucción) a temperaturas normales. Esta cualidad permite emplearlas en puntos del campo luminoso de difícil acceso de medición. Gracias al pequeño espesor, la microsonda de fibras no distorsiona prácticamente el campo luminoso investigado.

La microsonda de fibras puede fijar irradiaciones del campo luminoso para cualquier abertura característica de éste, incluso el flujo difuso en el aire o en líquido de bajo coeficiente de refracción. Una alta transmisión de luz de la fibra óptica unitaria (de 0,70 a 0,90 en un metro de longitud) garantiza una gran sensibilidad de la sonda de pruebas luminosa y permite utilizarla también para el análisis de campos luminosos

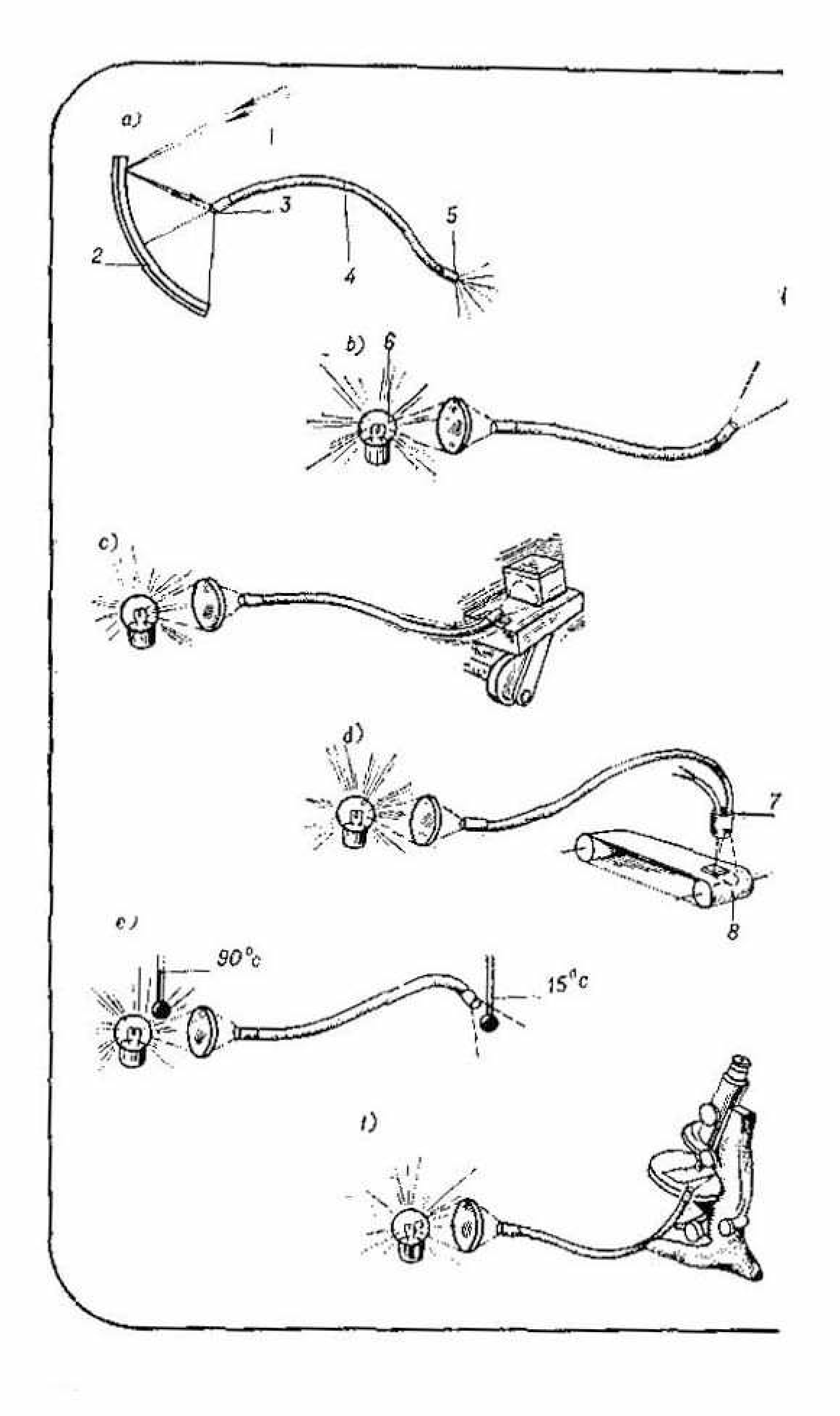

6
5
4
1
3
2

débiles. La distancia entre el punto investigado del campo luminoso y el receptor puede ser prácticamente cualquiera.

Esquema típico de empleo de los conductos de luz unitarios. En la fig. 56, *a* se representa el principio de empleo de los elementos fibrosos. Los rayos *1* de la fuente de emisión se concentran por un sistema óptico *2* sobre el extremo de salida *3* del canal de transmisión de luz *4*, se difunden por éste y salen por el extremo de salida *5*. En la fig. 56, *b* se representa un conducto de luz para la iluminación a distancia en forma de un haz de fibras flexibles *4*, el cual transmite a distancia la radiación de la lámpara *6*, concentrada por el objetivo *2*. Estos haces de iluminación empleados en los instrumentos luminotécnicos tienen una serie de ventajas: en la fig. 56, *c* se representa la iluminación de un objeto vibrante; gracias a la flexibilidad del conducto de luz, la lámpara y sus conexiones quedan fuera del campo de acción de la vibración, lo que aumenta su fiabilidad y el plazo de funcionamiento. La combinación del conducto de luz *4* y la célula fotoeléctrica *7* (fig. 56,*d*) permitió simplificar el mecanismo de cómputo o la determinación de posición del objeto: el flujo luminoso saliente del conducto de luz se refleja del objeto *8* e incide en la célula fotoeléctrica *7*. Una gran ventaja de los elementos fibrosos de iluminación consiste en que ellos absorben los rayos infrarrojos (denominados también caloríficos) y transmiten sólo el intervalo visible de longitudes de ondas (fig. 56, *e*). Esto es necesario para muchos tipos de instrumentos, por ejemplo, los empleados en medicina, veterinaría, en iluminación de objetos explosivos, en la biomicroscopia, etc. En

←—

FIG. 55. Esquema de un microfotómetro de fibras



a)
1
2
3
4
5
b)
6
c)
d)
7
8
e)
90°c
15°c
f)

la fig. 56, *f* se representa la iluminación de la platina de un microscopio con luz fría.

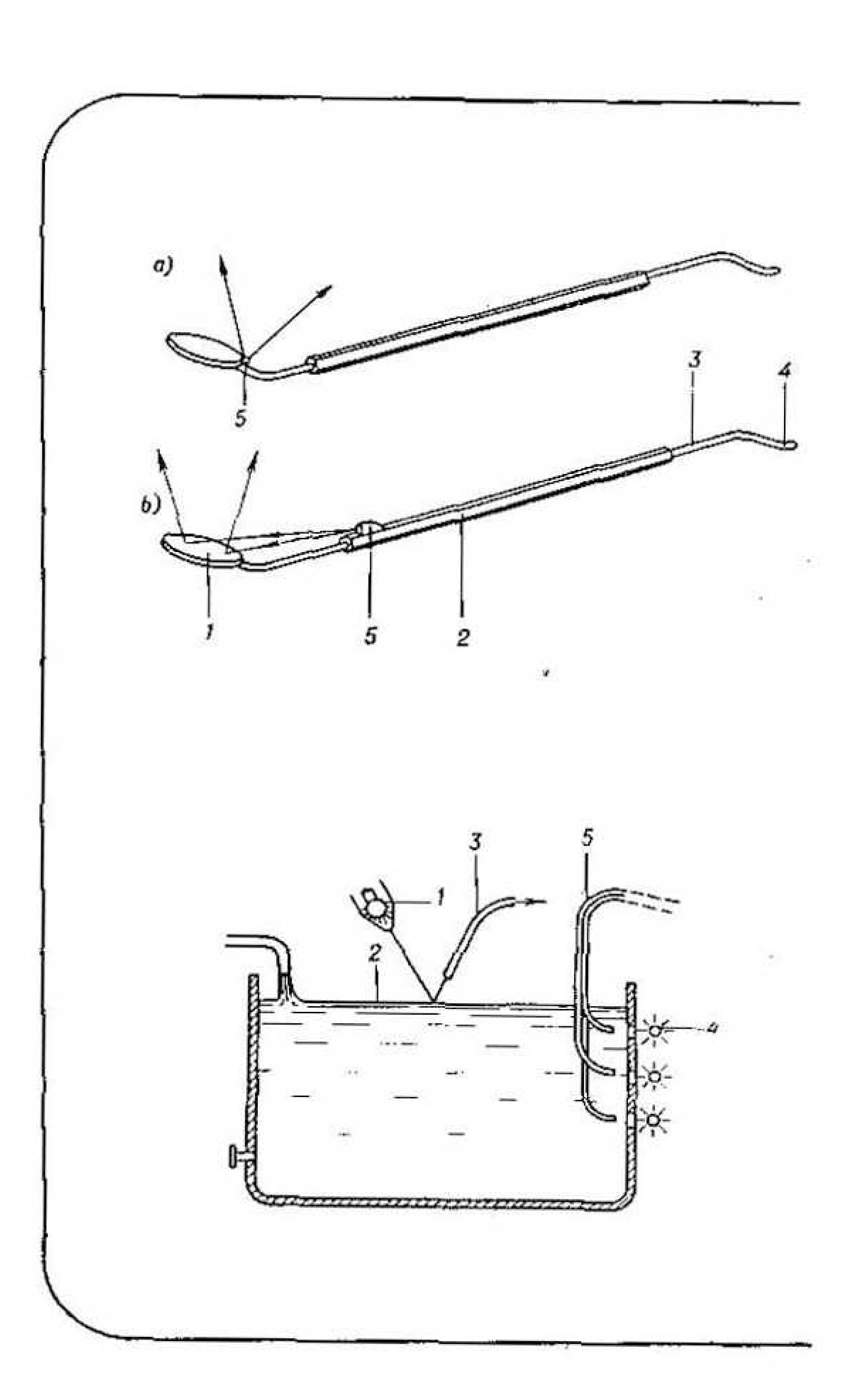
En la fig. 57 se representa un instrumento para el examen de las superficies internas de los dientes. Este proceso se dificultaba antes del empleo de las fibras ópticas debido a la baja iluminación; al introducir el espejo *1* del instrumento en la boca los dientes se veían mal. Los instrumentos modernos por su mango *2* se hace pasar un conducto de fibra de luz *3*, cuyo extremo de entrada está unido, por un haz de fibras flexible *4*, con una lámpara distanciada; la luz del extremo de salida *5* incide directamente sobre el objeto (fig. 57, *a*) o al ser reflejada en un espejo *1* (fig. 57, *b*)

El relé en fibra de desconexión (fig. 58) se basa en el hecho de que al alcanzar un objeto (en este caso la superficie del líquido) determinada posición (nivel) la luz de la fuente *1*, al reflejarse del objeto *2*, incide sobre el conducto de luz *3* y a través de éste va al fotorreceptor, el cual desconecta el movimiento del objeto (en nuestro caso, la alimentación de agua).

Refractómetros con conductos de luz monofilares sin revestimiento. Estos instrumentos están destinados para la medición del índice de refracción de líquidos. La abertura numérica del conducto de luz sen $u_0 = \sqrt{n_c^2 - n_u^2}$ para determinado índice de refracción n_c del filamento depende del índice de refracción n_u del revestimiento; por lo tanto, la transmisión de luz, τ_1, determinada por la relación (4), depende del índice de refracción del revestimiento. Esta propiedad de los conductos de luz es la base del principio de funcionamiento de los refractómetros con conductos de luz (fig. 59). La luz de la

←——

FIG. 56. Elementos fibrosos de primera clase para transmitir la luz a distancia



a)
5
3
4
б)
1
5
2
3
1
5
2
4

FIG. 57. Instrumento con un haz de guías de luz para el examen de las superficies internas de los dientes

⟵

lámpara *1* se concentra por el microobjetivo *2* sobre el extremo de entrada del conducto de luz *3*, el cual está montado dentro de una cubeta *4* que no deja pasar la luz y contiene el líquido a investigar. El flujo luminoso saliente se fija por medio del fotorreceptor *5*.

Como se puede ver en la fig. 59, *a*, el haz luminoso incidente sobre el extremo de entrada, se divide en tres componentes: una componente sin reflejarse de las paredes del conducto de luz incide directamente sobre el fotorreceptor, la segunda llega al fotorreceptor después de una serie de reflexiones internas totales en el límite de separación conducto de luz—líquido, y la tercera, que no es registrada por el receptor, incide sobre el límite de separación conducto de luz—líquido bajo un ángulo menor que el ángulo crítico de reflexión total interna y sale del conducto de luz. Mientras menor sea la diferencia $n_c - n_u$ mayor es la magnitud de la tercera componente, y menor es la transmisión de luz. Esto permite, según n_c conocida, determinar n_u del líquido.

En la fig. 59, *a* se puede ver que la magnitud de la primera componente no depende de la relación $n_c - n_u$. Dicha componente en este instrumento no contiene ninguna información, tiene un carácter parásito y limita la sensibilidad del refractómetro cuando $n_c - n_u$ es pequeña. Para compensar esto, en lugar de un conducto de luz recto sin revestimiento se emplea un conducto de luz curvo (fig. 59, *b*). En algunos refractómetros, para aumentar la velocidad y exactitud de medición se utiliza una serie de conductos de luz con

⟵

FIG. 58. Relé con guía de luz fibrosa

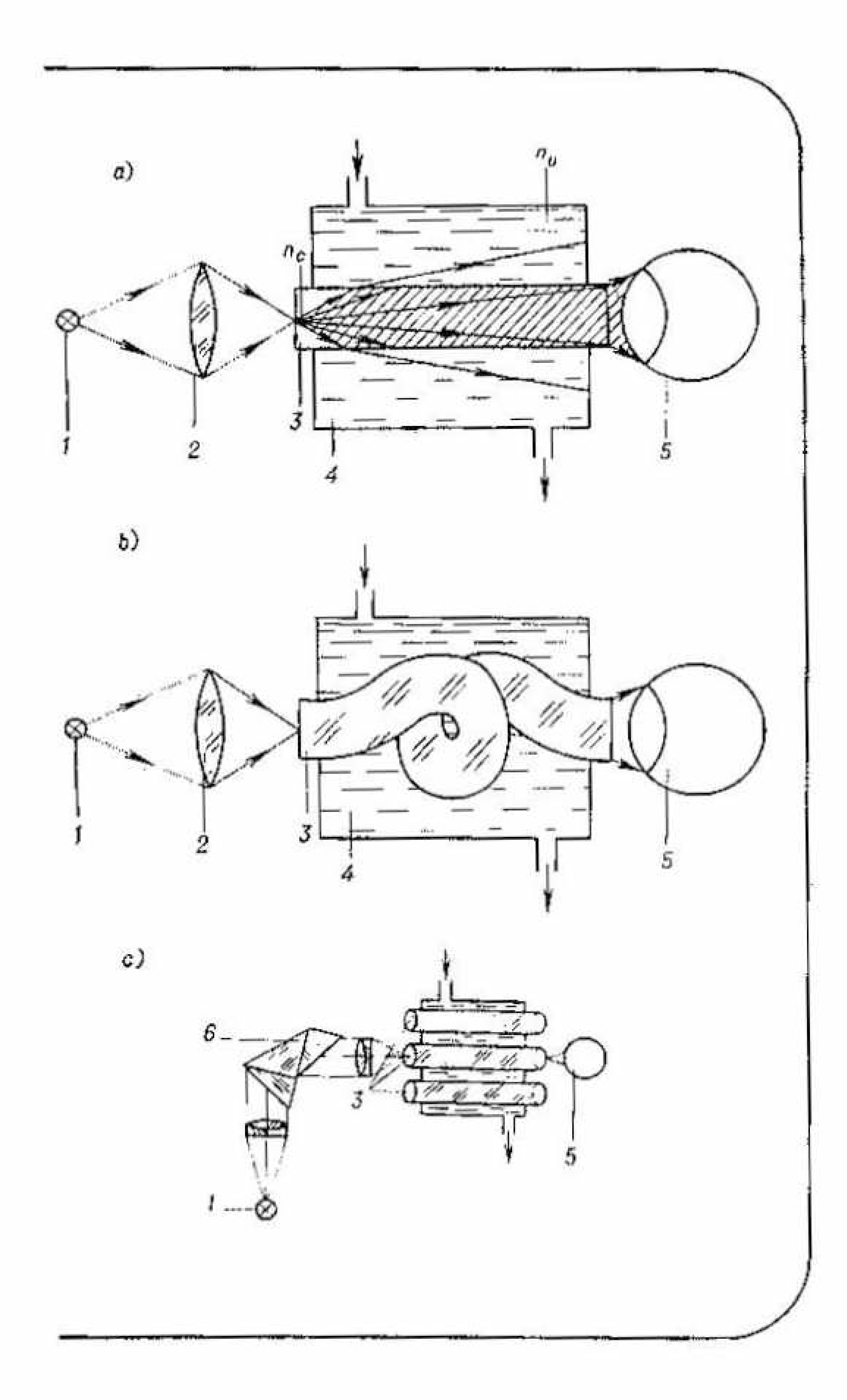
determinados índices de refracción conocidos (fig. 59, *c*); la luz de la fuente *1* a través de un monocromodor *6* incide sobre un extremo de uno de los conductos de luz. La cubeta con los conductos de luz es desplazable en el plano perpendicular al eje óptico del monocromodor. Este último se utiliza para la iluminación de los conductos de luz con un flujo de longitud prefijada de onda.

Los elementos fibrosos de la primera clase se emplean además para la iluminación de instrumentos y escalas diminutas, la iluminación de piezas internas para facilitar su inspección, el control de la llama en las calderas, la iluminación de tejidos profundos por medio de agujas de inyecciones intravenosas, la fotometría a bajas temperaturas, se usan en los instrumentos para medicina, y todo esto es sólo una pequeña enumeración de los usos de los elementos fibrosos de la primera clase.

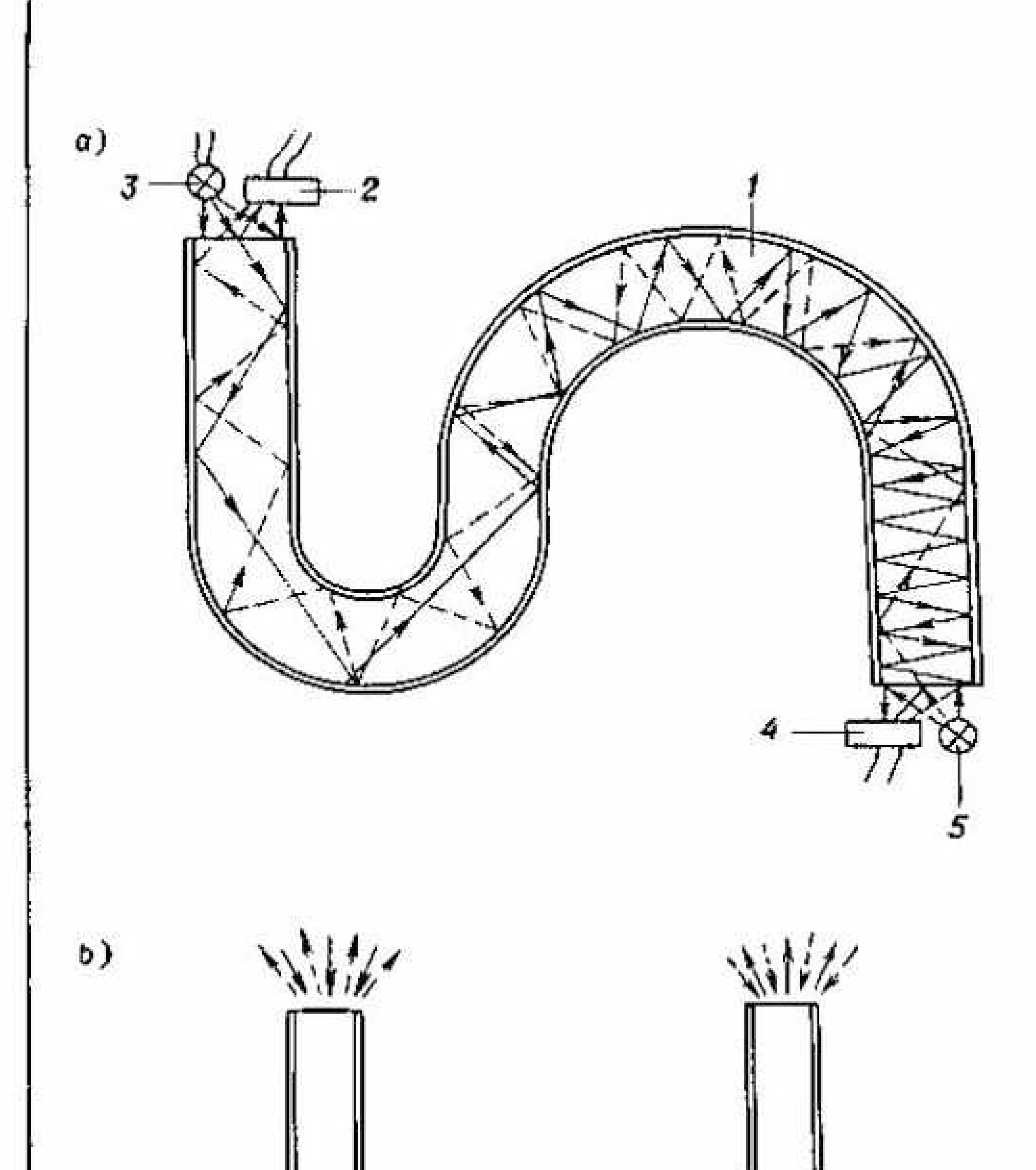
Régimen de trabajo bidireccional de los conductos de luz. El flujo luminoso, a diferencia de la corriente eléctrica, flujo de líquidos, gases y partículas sólidas, se distingue por su siguiente propiedad: los rayos luminosos pueden difundirse en un medio dado *independientemente* uno de otro cruzándose e incluso yendo al encuentro entre sí. A base de esta propiedad se utiliza un mismo conducto de luz *1* (fig. 60, *a*) para la transmisión simultánea de luz desde la lámpara de señales *3* al fotorreceptor *4* y la transmisión de la información luminosa desde la lámpara *5* a la fotocélula *2*. El régimen de trabajo bidireccional de los conductos de luz de la primera clase encontró una amplia utilización y un uso original en los dispositivos de señalización, en los siste-

⟶

FIG. 59. Esquema de un refractómetro con conductos de luz



a)
n_u
n_c
1
2
3
4
5
b)
1
2
3
4
5
c)
6
3
5
1


a)
3
2
1
4
5
b)

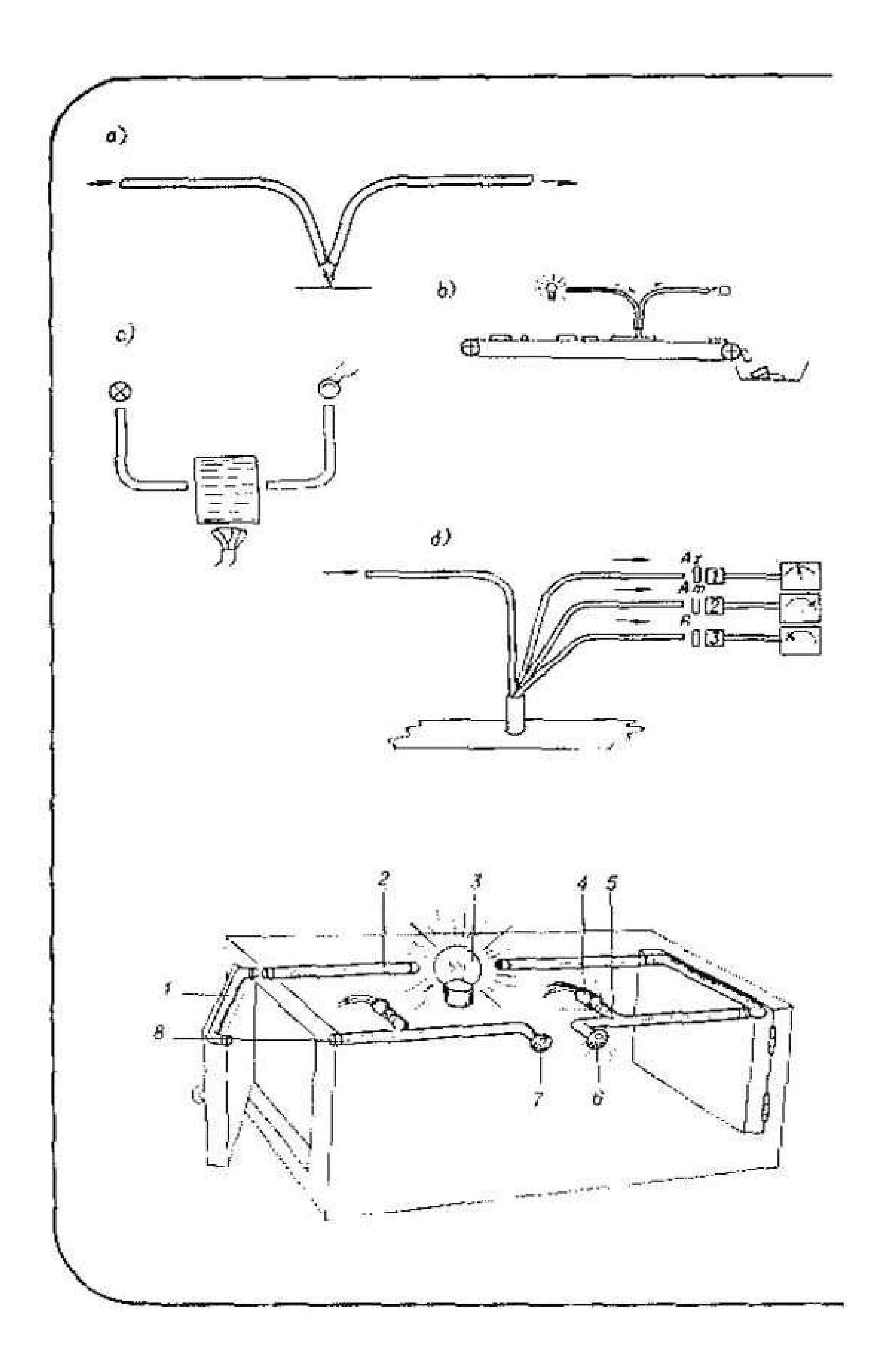
mas óptico-electrónicos, en las computadoras ópticas y otros instrumentos.

Fibras autoluminiscentes. Su funcionamiento se basa en el régimen bidireccional de trabajo de los conductos de luz. Por ejemplo, en los establecimientos son necesarios con frecuencia tableros luminiscentes que llamen la atención del público. Este tipo de problema existe en la técnica de propaganda. En estos casos se emplean los conductos de luz curvos (fig. 60, *b*) cuyas caras forman un circuito requerido. Al conectar la luz los rayos inciden sobre cada uno de los extremos de los conductos de luz y salen, respectivamente, por los extremos opuestos. El circuito, formado por los extremos de un conjunto de conductos de luz, tiene autoluminiscencia brillante en el fondo de las paredes y objetos circundantes. Este tipo de tableros se puede construir con vidrio de color o una variedad de conductos de luz a colores. En este caso no es necesaria la alimentación eléctrica para los conductos de luz autoluminiscentes.

Conexión en paralelo de varios conductos de luz. Este método permite simplificar considerablemente la construcción de los instrumentos, disminuir sus dimensiones y peso. Para obtener datos sobre el estado de una superficie sometida a un experimento (por ejemplo, térmico) se emplean dos haces transmisores de luz (fig. 61, *a*), por uno de los cuales se transmite a la superficie la luz de una fuente alejada y por el segundo, el flujo reflejado llega al fotorreceptor. La variación del estado de la superficie durante las pruebas se determina y registra según la variación del flujo luminoso incidente en el conducto receptor de luz. Un principio de uso similar se emplea

⟵

FIG. 60. Régimen de trabajo bidireccional de conductos de luz



a)
b)
c)
d)
Az
Am
R
1
2
3
1
2
3
4
5
6
7
8

FIG. 61. Conexión en paralelo de varios conductos de luz

←–—

para el cómputo del número y longitud de ciertos objetos que se mueven, por ejemplo, por un transportador (fig. 61, *b*). El empleo de dos conductos de luz permite determinar no sólo el estado de la superficie en prueba, sino además la transmisión de luz de un material transparente (fig. 61, *c*). Para una resolución más exacta, por ejemplo, del estado de la superficie experimentada o para el cómputo diferencial de objetos de diferente coloración (supongamos verde, amarilla o roja) que se mueven por el transportador, se emplean varios elementos de fibra, transmisores de luz: uno de ellos transmite la iluminación y, después de su reflexión sobre la superficie de los objetos, la luz incide en los demás conductos luz conectados en paralelo con los fotorreceptores *1*, *2*, *3* por medio de filtros de colores, cada uno de los cuales permite pasar sólo los rayos de determinado color, por ejemplo, color verde *V*, amarillo *A* y rojo *R* (fig. 61, *d*). En este caso, cada uno de los conductos receptores de luz se convierte en un contador de objetos del color (cromaticidad) correspondiente al filtro cromático a la salida.

Una lámpara para todo el automóvil. El sistema de iluminación de un automóvil moderno es bastante complicado. Para disminuir la cantidad de lámparas, portalámparas, longitud de cables, se emplea la óptica de fibras en los modelos experimentales ultramodernos en forma de conexiones en paralelo de haces flexibles. Una sola lámpara de iodo de 100 W de potencia, de la cual parten a distintos lugares los conductos de luz flexibles distribuyendo así la luz por diferentes puntos, sustituye un sinnumero de lámparas

←—–

FIG. 62. Esquema de bloqueo con conexión en serie de varios conductos de luz

en el automóvil. Sólo quedan los faros principales, para los cuales es necesario un fuerte flujo de luz.

Conexión en serie de varios conductos de luz. Este tipo de conexión se emplea ampliamente en la técnica de señales y bloqueo. La forma cómo accionan los elementos fibrosos empalmados se puede observar en la fig. 62. Cuando las puertas de la cámara están cerradas, la luz de la lámpara *3* pasa a través de los conductos de luz *2* empalmados en serie, y en el tablero de mando el operador ve los extremos de salida luminiscentes *6*. Además, por medio de las derivaciones *5* de los haces de fibras la luz se conduce a las fotocélulas, las cuales trabajan en régimen de bloqueo. Si la puerta se abre, se altera el empalme de los conductos de luz *1* y *8*, y en el tablero de control se apaga el extremo de salida *7*; en consecuencia, la señal eléctrica de la fotocélula *4*, transformada en señales luminosa o acústica, indica paralelamente la infracción en el circuito de los conductos de luz. En tales sistemas de señalización se emplean, como regla general, lámparas multifilares, de ahí que si un filamento se daña, esto no afecta el trabajo del sistema en general.

Amplificador de A. M. Jalfin. Uno de los ejemplos de conexión en serie de los conductos de luz de la primera clase es el amplificador de brillo de radiación, como es una fuente luminosa débil muy alejada: la luz *1* (fig. 63) a través de la lente de enfoque *2* se reúne en una entrada *3* del amplificador de brillo y saca del cátodo fotoeléctrico *4* los electrones; estos últimos son acelerados por el campo eléctrico y, al incidir en el luminóforo *5*, provocan su luminiscencia, la que, al observarla a través de la ventana de sálida *6*, unas 15 a 20 veces es más brillante que los rayos *1*.

El flujo luminoso ya amplificado se transmite de nuevo por medio del conducto de luz *7* a la

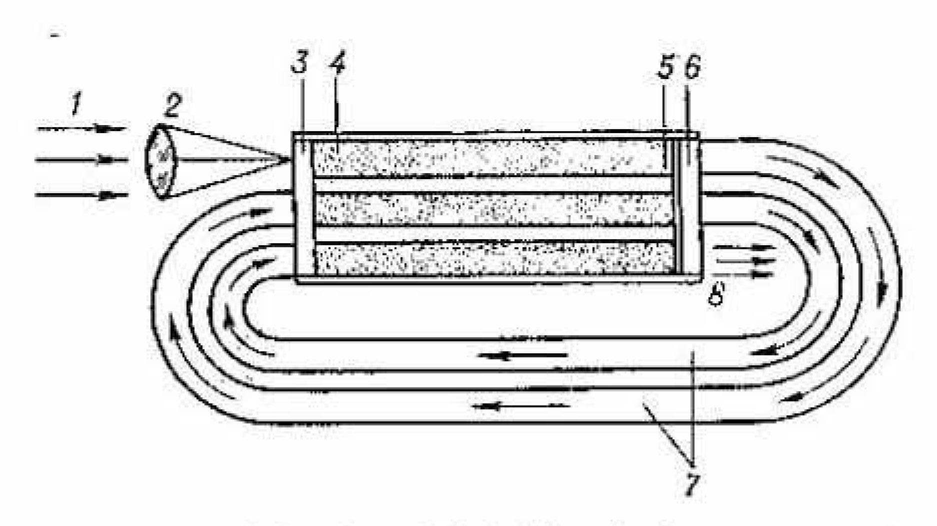


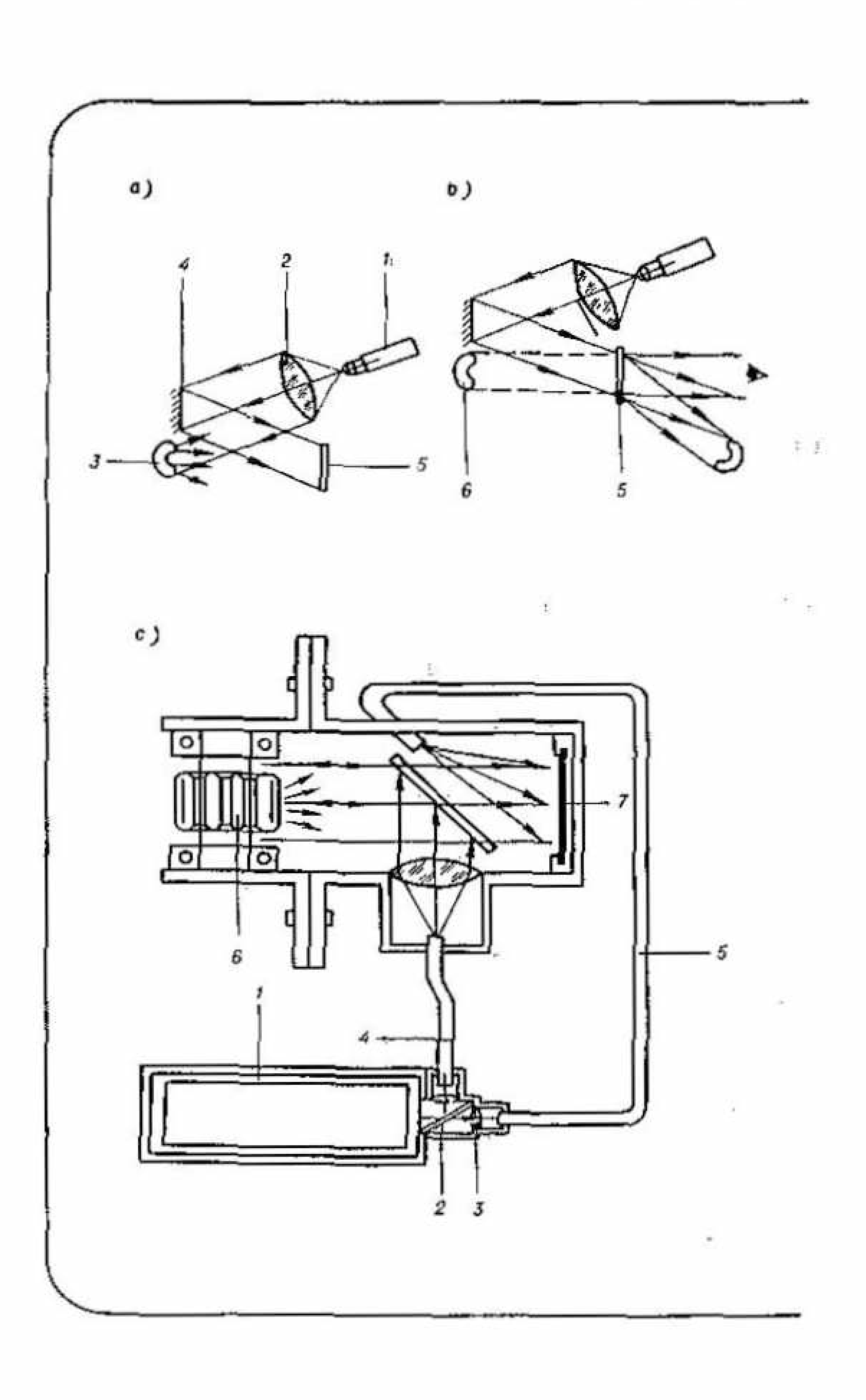
FIG. 63. Amplificador del brillo de luz con conductos de luz

entrada del amplificador aumentando así su intensidad en 15—20 veces; ésta, a su vez, vuelve a transmitirse, a través del conducto de luz, a la entrada. El flujo emergente *8* queda muy amplificado con respecto al flujo inicial incidente *1*.

Los elementos fibrosos de la primera clase empleados en conexiones en serie, se utilizan en los sistemas de señalización para abrir o cerrar puertas, en los lugares donde no hay puertas para la determinación del paso de los objetos, en las cajas fuertes, en los submarinos, en las instalaciones de técnica de seguridad, y otros.

La ventaja de los conductos fibrosos de luz consiste en su involurabilidad. Otros elementos auxiliares (como lámparas, baterías, fotocélulas) deben ser sustituibles o dispuestos en lugares de fácil acceso para simplificar su reemplazo, o al contrario, dispuestos en lugares de difícil acceso para protegerlos de acciones externas. Los sistemas fibrosos de señalización se distinguen por sus pequeñas dimensiones, cómoda construcción y alta seguridad de funcionamiento durante su empleo.

Elementos fibrosos en la holografía. El esquema elemental de obtención de hologramas consiste


a)
b)
c)
4
2
1
3
5
6
5
7
6
5
1
4
2
3

en lo siguiente: la luz del láser *1* a través del dilatador *2* del haz de rayos (fig. 64, *a*) incide en el objeto *3*. La onda de luz difundida por el objeto *3* (*haz de rayos de trabajo*) incide sobre una placa fotográfica *5*. Sobre esta misma placa incide el *haz de rayos de referencia*, o sea, parte de la luz del mismo láser reflejada por el espejo *4*. En la placa fotográfica queda grabada la figura interferencial de la acción conjunta de los rayos llegados a través del ramal de trabajo y del de referencia del interferómetro. Después de revelada la placa fotográfica, prácticamente se puede observar una figura que se diferencia poco de una placa fotográfica velada uniformemente y desde el punto de vista óptico en ella no hay ninguna imagen. Pero si ahora se conecta de nuevo el láser, y se coloca el holograma habiendo quitado el objeto, podemos observar a través del holograma al igual que por la ventana, el objeto *6* en el mismo lugar (fig. 64, *b*), como si no hubiera sido quitado. El objeto observado tiene un aspecto al parecer real: variando la posición de la vista se pueden ver las partes alejadas y cercanas del objeto, e incluso, algunas partes que no se ven desde una posición y son visibles desde otras.

El empleo de la fibroóptica permite obtener hologramas de objetos dispuestos en *lugares inaccesibles y peligrosos*: como de partículas en suspensión en un líquido, contenedores cerrados, elementos de combustión en reactores nucleares, mecanismos internos de máquinas y otros. En la fig. 64, *c* se representa el esquema de obtención del holograma de un motor eléctrico *6*: la luz del láser *1*, que pasa a través de la placa divisora de luz *2* y los objetivos *3* incide sobre los

⟵——

FIG. 64. Elementos fibrosos de primera clase en holografía

conductos de luz *4* y *5* (el conducto de luz *4* funciona en la sección de trabajo y el conducto de luz *5*, en la sección de referencia del interferómetro). La radiación del láser a través del conducto de luz *4*, el objetivo y el espejo semitransparente incide sobre el objeto *6* y la luz difundida por éste incide en la placa fotográfica *7*, sobre la cual además incide el haz de referencia a través del conducto *5*. El holograma obtenido de esta forma contiene la información sobre el estado y defectos de trabajo del motor en el momento de la radiación. El holograma así obtenido se expone a la iluminación por el mismo láser a través del conducto de luz *5*, después de lo cual se estudia el objeto fijado.

Los ejemplos anteriores son algunos de casos en que se emplean los elementos fibrosos de la primera clase, y no expresan la verdadera difusión y las posibilidades de uso de los esquemas de éstos en la fabricación de instrumentos; la propiedad de las fibras de transmitir rayos de diferentes colores ha permitido su empleo en la colorimetría (medición de colores), los haces de fibras irregulares se emplean para la transmisión a distancia de flujos potentes de radiación, por ejemplo, desde la mancha focal de los heliconcentradores, para la transmisión de la radiación del láser, incluso adentro del organismo humano con fines radioterapéutica interna, la transmisión de señales de mando a distancia de diferentes máquinas, el control a distancia de sistemas de calefacción central, en los aparatos de entrenamiento de pilotos y cosmonautas, la transmisión de señales de láser en los sistemas de radio y comunicación telefónica, de señales de corriente continua en los rectificadores semiconductores, la transmisión de la señal luminosa de referencia en los instrumentos de fotometría y muchas cosas más.

11. SEGUNDA CLASE: ELEMENTOS FIBROSOS PARA LA TRANSMISION DE IMAGENES OPTICAS

A la segunda clase se refieren los elementos fibrosos regulares (esquema 2), destinados a la transmisión a distancia de la imagen óptica, o sea, la información organizada, por medio de canales rígidos o flexibles, rectos o curvos.

Como se puede observar en la tabla 6, actualmente la difusión de los elementos de esta clase en la fabricación de instrumentos es cerca del 9% del número total de tipos de sistemas de conductos de luz. Los elementos de esta clase están constituidos por construcciones multifilares con igual distribución regular de filamentos elementales, conductores de luz, en ambos extremos del haz con bocas-campos luminosos (informativos) obligatoriamente iguales por su forma y superficie de trabajo en ambos extremos del haz, y, como regla general, de secciones rectas. A la segunda clase pertenecen *dos tipos* de elementos fibrosos: haces de fibras regulares flexibles y rígidos (estos últimos, de acuerdo con las exigencias, se fabrican rectos y con curvatura rígida constante). En la actualidad, los haces de conductos de luz de la segunda clase más empleados en la fabricación de instrumentos, tienen secciones de 0,5 a 400 mm y longitudes por el eje del conducto de luz de 0,5 a 4000 mm y más.

Requerimientos técnicos básicos a los elementos fibrosos. La transmisión de luz de los conductos se determina por la relación entre el flujo luminoso de entrada y el de salida por ambos extremos, es decir, es algo así como el *rendimiento energético*. Por esto, en todas las diez clases de elementos se requieren altas cualidades en cuanto a la transmisión de luz. Si para

Esquema 2

Segunda clase; elementos fibrosos para la transmisión de la imagen

- Flexibles
  - Haz de fibras
    - Extremos mecánicamente prensados
    - Extremos pegados
    - Extremos sinterizados
      - Extremos herméticos al vacío
      - Extremos no herméticos al vacío
  - Fibra unitaria multifilar
    - Con sección simétrica axial
    - Con sección rectangular
- Rígidos
  - Rectos
  - Con curvatura constante
    - (Rectos y Con curvatura constante:)
      - Con recubrimiento aislante de luz transparente
      - Con recubrimiento aislante de luz semitransparente
        - (ambos:)
          - Herméticos al vacío
          - No herméticos al vacío

los conductos de luz de la primera clase los requerimientos de transmisión de luz son fundamentales, para los de la segunda clase se exige la resolución de determinada frecuencia de líneas de mira, así como transmitir la imagen con determinado contraste, o sea, deben tener determinado coeficiente de transmisión de contraste, es decir, un *rendimiento informativo*. En el capítulo III se demostró que para los sistemas de conductos de luz destinados a la transmisión de la imagen óptica, la transmisión de luz y el coeficiente de transmisión de contraste (y por lo tanto, el poder resolutivo y los ruidos micro y macroestructurales) están tan ligados entre sí que es imposible la variación arbitraria de uno sin variar otro. De aquí que las características ópticas tales como la abertura numérica, la transmisión de luz, el coeficiente de transmisión de contraste, el poder resolutivo y los ruidos estruturales de los sistemas de conductos de luz de la segunda clase y los requerimientos reclamados a ellos se consideran en su interrelación para cada caso concreto de las condiciones de trabajo de los elementos fibrosos en los instrumentos.

1. El sistema objetivo—haz de conductos de luz—ocular es uno de los más típicos y difundidos en la fabricación de instrumentos óptico-mecánicos. Ya que la abertura numérica de los objetivos y oculares generalmente no es muy grande (cerca de 0,4—0,6), para obtener un coeficiente alto de transmisión de contraste se debe obligatoriamente obedecer el principio de concordancia de las aberturas (véase el capítulo II), o sea, la abertura del haz de conductos de luz tiene que ser igual o un poco mayor que la abertura del objetivo y del ocular. El poder resolutivo del haz de conductos de luz en estos sistemas debe ser, por regla general, mayor de 50 líneas/mm

y en algunos instrumentos ha de llegar hasta 100—120 líneas/mm. El ruido microestructural no se normaliza, pero se exigen requerimientos rigurosos en cuanto a los defectos y al aspecto macromosaico. Para la transmisión de imágenes a colores, por ejemplo, en los instrumentos empleados en medicina, es necesario una transmisión de luz equidimensional en un intervalo de longitudes de ondas entre 0,4 y 0,8 μ y, entre otras cosas, esta condición es más importante que la obtención de una alta transmisión de luz sólo para longitudes de ondas medias, por ejemplo, entre 0,5 y 0,6 μ.

2. El sistema objetivo—haz de conductos de luz—ojo permite emplear elementos fibrosos con un poder resolutivo de cerca de 10—15 líneas/mm, los aspectos macromosaicos y defectos estructurales no mayores que 100 μ. Estos últimos, aunque tengan dimensiones hasta unas decenas de micras, no han de localizarse en espacios de más de 100 μ. En algunos sistemas las exigencias, en lo que se refiere a los defectos, son más rigurosas ya que en dependencia de las condiciones de alumbrado del extremo de entrada incluso los microdefectos de 10—20 μ se convierten en fuentes de dispersión intensa de la luz, perceptibles por simple vista. En cuanto a los ruidos microestructurales no hay requerimientos, el contraste de la imagen no debe ser menor que la sensibilidad de contraste del ojo humano (cerca de un 5—10%).

3. El sistema luminóforo—haz de conductos de luz—ojo humano está difundido en la fabricación de instrumentos ópticos. El luminóforo es una fuente de radiación difusa ($A_1 = 1$). Cuando las observaciones deben realizarse a diferentes inclinaciones angulares, incluso con ángulos grandes con respecto al eje de los conductos de luz, para obtener una alta transmisión de luz y un alto contraste de imagen es necesario que los

conductos de luz tengan una abertura numérica nominal $A_0 > 1$. Esto se deduce del principio de concordancia de las aberturas. Si las observaciones se realizan en direcciones próximas a la normal, en presencia de una fuerte iluminación externa, entonces es permitido (violando el principio de concordancia de aberturas) emplear el haz de conductos de luz con $A_0 < 1$, pero con un alto coeficiente de transmisión de contraste (o sea, con el recubrimiento de las fibras que absorbe la luz) y, por consiguiente, una transmisión de luz relativamente baja. Las exigencias en cuanto a los ruidos estructurales, defectos y el poder resolutivo son similares al caso anterior.

4. El sistema luminóforo—haz de conductos de luz—placa fotográfica se emplea en la fabricación de instrumentos electronoópticos para el fotorregistro por contacto de la imagen obtenida en el extremo de salida del elemento fibroso. A base del principio de concordancia de aberturas se logra una relación óptima entre la transmisión de luz y el contraste para aberturas numéricas $A_0 > 1$. En comparación con el ojo humano la placa fotográfica puede registrar contrastes más altos y por eso es necesario un coeficiente de contraste más alto. Los defectos y aspectos macromosaicos son inaceptables en la mayoría de los casos, las exigencias en cuanto al poder resolutivo, en dependencia del destino de los instrumentos electroópticos, oscila desde 20—25 (como en los tubos oscilográficos de rayos catódicos) hasta 90—100 líneas/mm (como el convertidor electronoóptico de tres cámaras). El nivel de ruido microestructural debe ser muy bajo en los tubos de rayos catódicos de alto poder resolutivo, y puede ser un poco más alto en los tubos de poder resolutivo entre 25 y 35 líneas/mm y no se normaliza (o sea, no influye en la calidad de la información) en los tubos de rayos catódicos

oscilográficos. El ruido microestructural consistente en la irregularidad de la transmisión de luz que aparece durante la exploración de una mancha luminosa con área de 5 a 10 filamentos conductores de luz, tiene lugar sólo en los tubos de rayos catódicos en los cuales la imagen se forma por la mancha de exploración. En los convertidores electronoópticos, así como en los instrumentos mecanoópticos, la imagen en todo el campo se forma a un mismo tiempo y no en forma de exploración. Por esta causa el ruido microestructural no es perceptible en estos instrumentos y no se reglamenta en las exigencias que se presenten a los artículos fibrosos.

Si en el sistema antes visto, la holgura entre el haz de conductos de luz y la placa fotográfica es en gran medida superior a 1—2 μ, para la obtención de una fotografía con suficiente contraste son necesarias piezas fibrosas de abertura numérica de 0,5—0,6 con una intercalación aislante y absorbente de luz entre los filamentos. Estos dos últimos factores implican una indicatriz alargada de la distribución luminosa a la salida de los conductos de luz, lo que contribuye a la disminución del grado de decremento del contraste de la imagen fijada en la placa fotográfica.

5. El sistema objetivo—haz de conductos de luz—placa fotográfica exige de los elementos fibrosos propiedades análogas al caso anterior: alta transmisión de luz, abertura numérica $A_0 = 1$, alto coeficiente de transmisión del contraste, poder resolutivo de 80 a 100 líneas/mm y más. Hay que tener en cuenta que en estos sistemas es limitado el poder resolutivo del haz de conductos de luz (véase el capítulo III), lo que no deja realizar en la salida los poderes resolutivos, habitualmente altos, de los objetivos. Los defectos y los aspectos mosaicos en estos sistemas son inadmisibles. El ruido microestructural no se

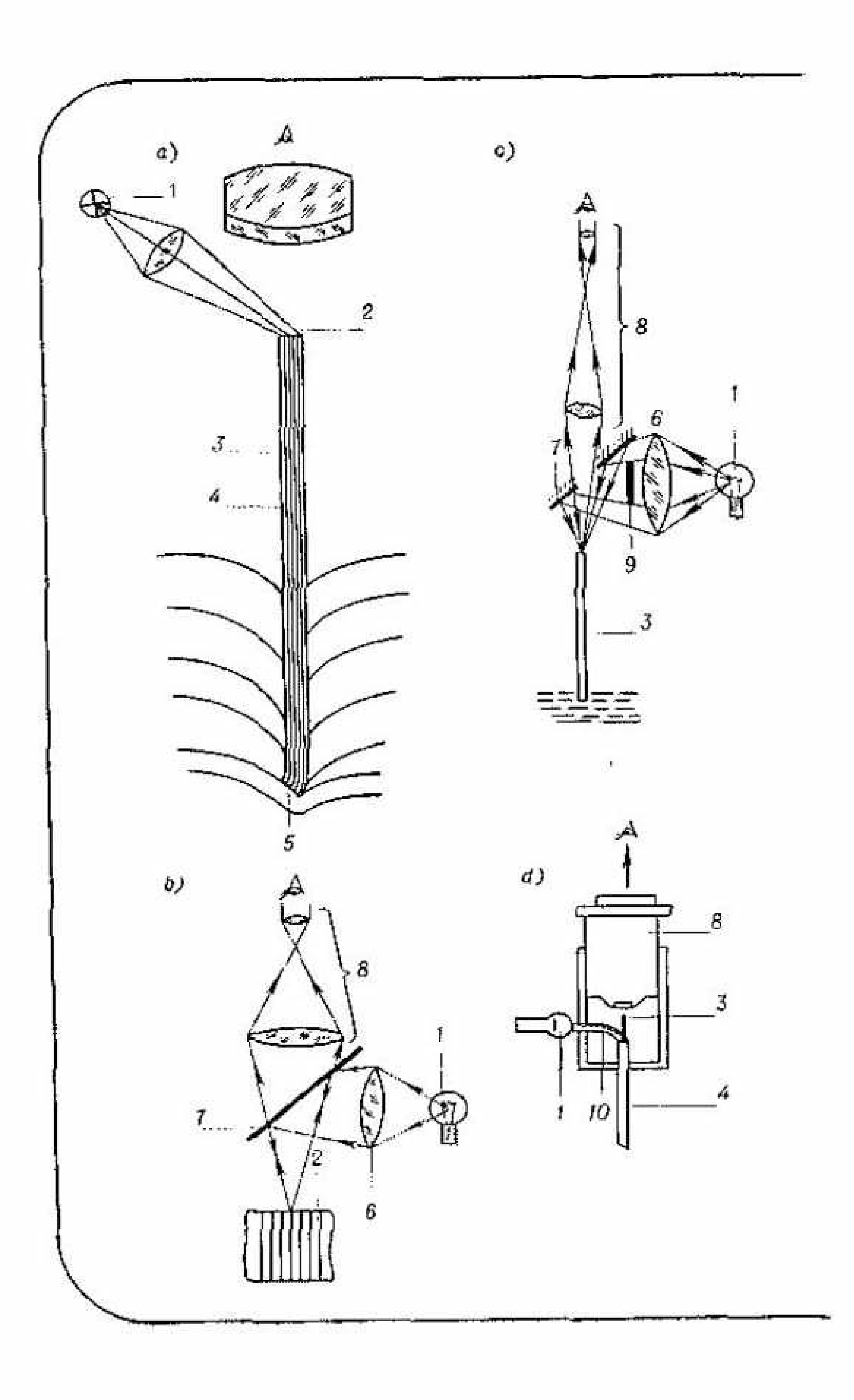
reglamenta debido a la formación simultánea de la imagen en todo el campo.

6. El sistema objeto—holgura—haz de conductos de luz—receptor de información ha sido suficientemente examinado en el capítulo III. Debemos recordar que en este sistema se exige una alta transmisión de luz, la existencia de pantallas de absorción de luz en los extremos de entrada de las intercalaciones aislantes de luz o la existencia de envolturas semitransparentes y relativamente pequeñas aberturas numéricas de los conductos de luz. Los defectos y aspectos mosaicos no son permitidos, el ruido microestructural no se normaliza.

Para los elementos fibrosos de la segunda clase es necesaria una *flexibilidad* igual a la de los elementos de la primera clase. En la actualidad esta flexibilidad de los haces de fibras se emplea sobre todo en la fabricación de instrumentos médicos.

El campo luminoso que es el área de los extremos de los conductos de luz, de diferentes dimensiones y formas se emplea en la fabricación de instrumentos. En particular, los campos luminosos de los elementos de fibra empleados en la fabricación de instrumentos electronoópticos, así como en calidad de pantallas traslúcidas (en lugar de pantallas opalinas, mates y enceradas), tienen un diámetro o diagonal en los rectángulos hasta de 400 mm y a veces más; las formas más difundidas son la redonda, cuadrada y rectangular, también se emplean en forma de tira alargada entre 10 y 20 mm de ancho.

Principios de empleo de los conductos de luz. De lo anteriormente expuesto se pueden deducir algunos principios de empleo de los elementos fibrosos de la segunda clase en la fabricación de instrumentos. A continuación se exponen algunos principios fundamentales no descritos anteriormente.



a)
1
2
3
4
5
b)
8
1
7
2
6
c)
8
1
6
7
9
3
d)
8
3
1
10
4

1. La realización de funciones do elementos do dos clases en un mismo haz de conductos de luz es en principio posible, aunque relativamente un caso poco frecuente. Así, por ejemplo, la *aguja-microscopio* hipodérmica (fig. 65, *a*) que permite a los médicos observar los tejidos dispuestos profundamente sin necesidad de intervención quirúrgica, tiene el haz fino regular de fibras ópticas *3* internado en la aguja patrón *4* para inyecciones hipodérmicas. La luz de la lámpara *1* a un ángulo suficientemente grande $u_1 < u_0$ incide sobre el extremo *2* del haz de fibras, se transmite al otro extremo *5* e ilumina los tejidos en contacto con el extremo. La imagen de la sección del tejido en contacto con el extremo *5* del haz de fibras se transmite al extremo *2* observado por medio de un microscopio. Para fijar la imagen transmitida el microscopio está dotado de una cámara fotográfica.

En el instrumento dado se emplea el principio de régimen de trabajo bidireccional del haz de conductos de luz el cual cumple las funciones de los elementos de la primera clase (transmisión de luz para la iluminación) y los conductos de luz de la segunda clase (transmisión de la imagen). En tales instrumentos se emplean dos métodos de observación de la imagen: de iluminación total (fig. 65, *b*) y de sombra total (fig. 65,*c*). Al emplear el método de observación de iluminación total los rayos incidentes en el

←— -- —

FIG. 65. Esquemas de agujas -microscopios para observaciones hipodérmicas: *a*, *b* — iluminación de la cara del haz regular de conductos de luz bajo el ángulo $u_1 < u_0$ (observación con iluminación total); *c*, *d* — (observación con sombra total):

1—fuente de luz; *2*—cara del haz de conductos de luz; *3*—haz de conductos de luz para transmitir la imagen; *4*—aguja; *5*—cara distal de los conductos de luz; *6*—condensadores; *7*—espejos; *8*—microscopios; *9*—pantalla opaca; *10*—haz alumbrador de fibras

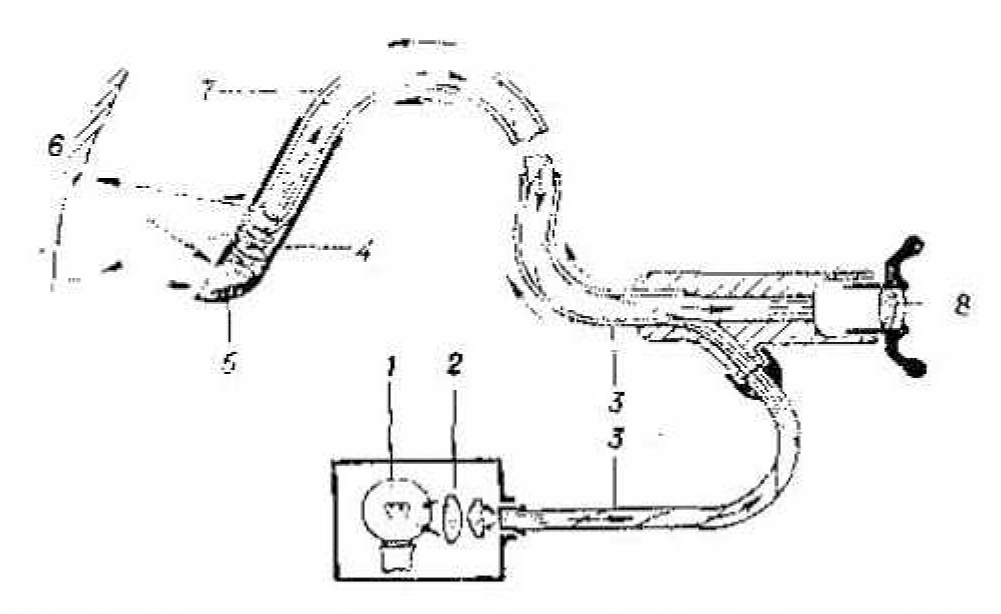


FIG. 66. Esquema de un endoscopio flexible para observar cavidades poco accesible

extremo *2* del haz de conductos de luz tienen una reflexión parcial (llamada también reflexión de Fresnel) y son captados por el microscopio y luego por el ojo, disminuyendo así el contraste de la imagen. Este fenómeno no se observa cuando se emplea el método de sombra total: los rayos reflejados del extremo *2* del haz de conductos no son captados por el ojo.

2. La combinación de elementos fibrosos de dos o más clases en un solo instrumento, cada uno de los cuales lleva a cabo sus funciones, está bastante difundida en la fabricación de instrumentos. En la fig. 66 se representa el esquema de un *endoscopio flexible* para la observación de los órganos internos del hombre. En este instrumento se emplea el haz flexible transmisor luminoso de fibras *3*, elemento de la primera clase que transmite la radiación de la lámpara *1*, a través de las lentes *2* térmicamente aisladas, en forma de «luz fría» para la iluminación del objeto *6* en la cavidad interna. Los rayos, después de reflejados por el objeto *6*, se proyectan por medio del prisma *5* y el objetivo *4* al extremo de entrada del haz regular flexible de fibras *7* (elemento de

la segunda clase); este último transmite la imagen al extremo de salida donde es observada por medio del ocular *8*.

3. Las conexiones en serie y en paralelo de los conductos de luz de la segunda clase están bastante difundidas en la fabricación de instrumentos. En la fig. 67, *a* se representa el esquema de conexión en paralelo de haces regulares de fibras. La imagen del objeto *1* por medio de los objetivos *2* se proyecta sobre los extremos (caras) de entrada de los conductos de luz *3* y se transmite a los extremos de salida, con lo cual se logra la transmisión de la imagen de un objeto por medio de varios haces a diferentes observadores. La conexión en serie de elementos fibrosos de la segunda clase es más frecuente en la fabricación de instrumentos que la conexión en paralelo. En algunos dispositivos se exige la transmisión de un objeto *1* (fig. 67, *b*) por medio de un haz regular de fibras flexible *3*; la imagen a la salida debe ser aumentada por un sistema sin oculares (el contacto del ojo con el ocular es inadmisible en algunos dispositivos como en el caso de vibraciones o cuando el operador debe observar varias fuentes de información a la vez). En este caso se acopla en serie al extremo de salida del haz flexible un focón rígido de ensanchado *4*. Como ya se había indicado en el capítulo III, la conexión en serie de haces regulares de conductos de luz disminuye la transmisión de luz total, el coeficiente de transmisión de contraste y el poder resolutivo.

4. Los conductos de luz de la segunda clase se emplean en los instrumentos en regímenes estáticos y dinámicos. Los haces flexibles de fibras regulares generalmente se emplean en los regímenes dinámicos de trabajo, durante los cuales varían (periódica o continuamente) el carácter y grado de curvatura y torcimiento del canal

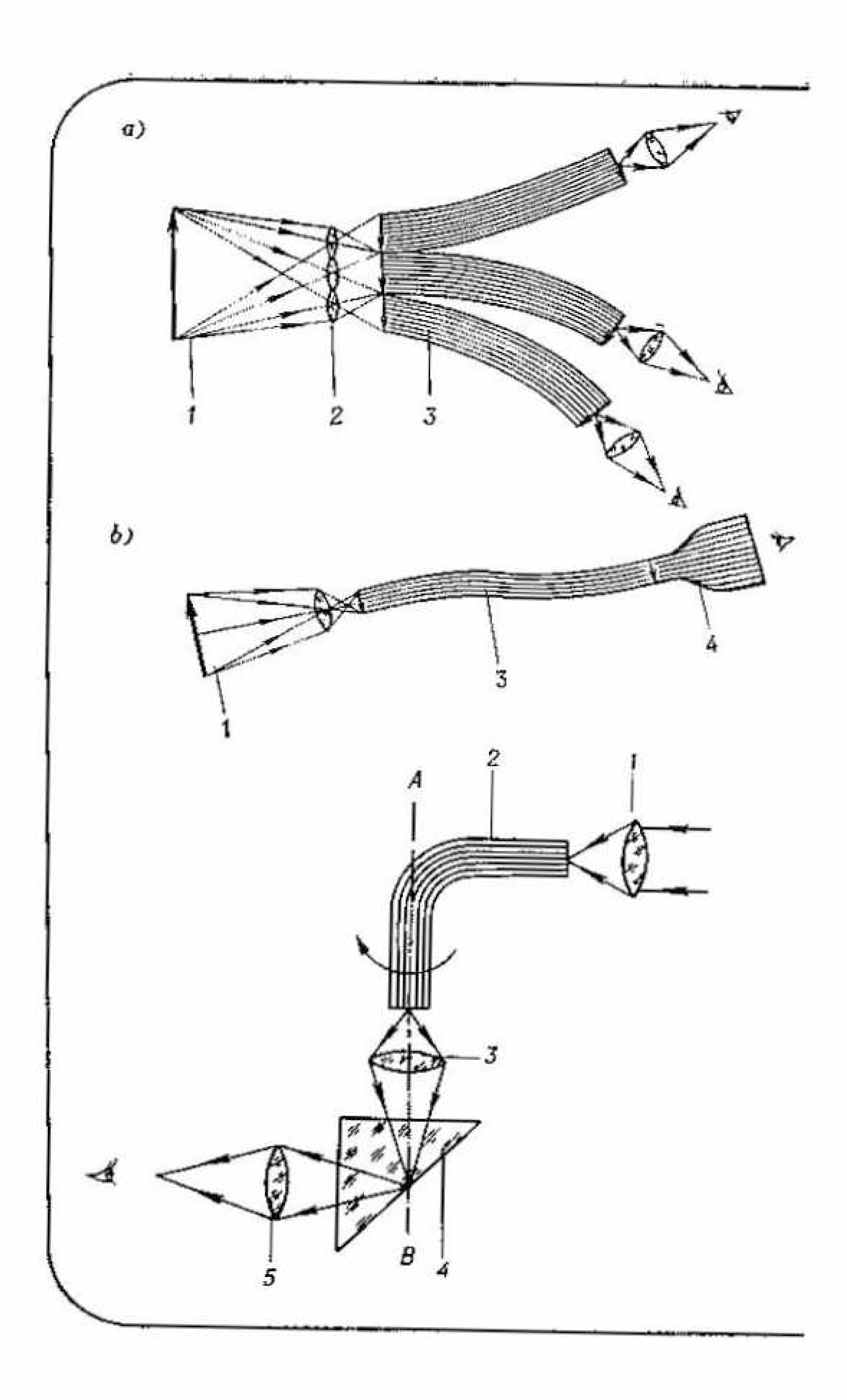

a)
1
2
3
b)
1
3
4
A
2
1
3
5
B
4

FIG. 67. Conexiones en paralelo (*a*) y en serie (*b*) de elementos fibrosos para transmitir la imagen

←—

y igualmente la distancia geométrica mínima entre los extremos de entrada y salida. En la gran mayoría de los casos se emplean los haces rígidos regulares de fibras en posición fija y estática, inmovilizados durante el montaje y reglaje de todo el dispositivo. Sin embargo, en algunos instrumentos los conductos de luz rígidos se emplean en regímenes dinámicos. En la fig. 68 se representa el esquema de un periscopio de vista circular por exploración: la imagen del objeto por medio del objetivo *1* se proyecta sobre el extremo de entrada del haz rígido de fibras doblado *2* y se transmite, a través de la lente *3*, el prisma *4* y el ocular *5*, al observador. El sistema formado por el objetivo *1*, el conducto de luz *2* y la lente *3* gira alrededor del eje *AB* explorando de tal forma el espacio exterior y transmite su imagen al observador fijo.

5. En una serie de instrumentos, debido a las limitaciones de espacio, es imposible disponer el sistema de lentes en el extremo de entrada del haz de conductos de luz para formar por proyección la imagen del objeto sobre este extremo, como en el caso, por ejemplo, de la aguja-microscopio antes vista (fig. 65, *a*). En la fabricación de instrumentos, el principio de transmisión de imagen a contacto o cuasicontacto por medio de un haz de fibras es empleado ampliamente. En la fig. 69 se representa el esquema de una cámara de exploración utilizada en investigaciones de zonas activas de un reactor atómico. La luz de la fuente *3* por medio del condensador *4* y el espejo *2* se recoge en el extremo redondo de entrada del

←—

FIG. 68. Regimen dinámico de empleo del haz rígido regular de conductos de luz

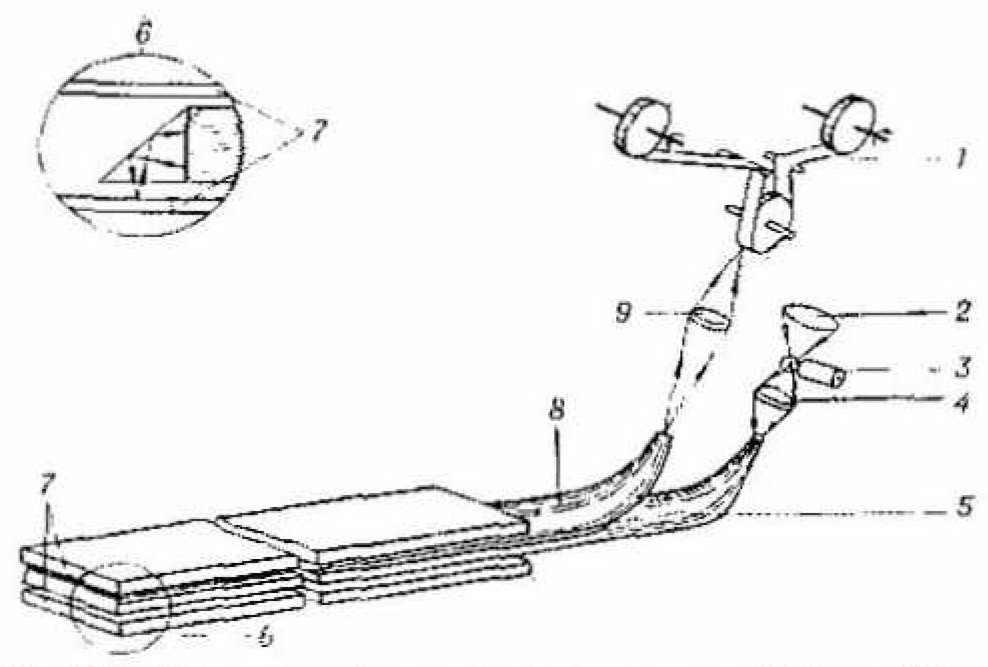


FIG. 69. Esquema de una cámara con óptica fibrosa utilizada para investigaciones de las zonas activas de un reactor atómico

haz irregular de fibras *5* (el elemento de la tercera clase) y se transmite al extremo alejado de la sonda estrecha transformando la mancha luminosa circular en la de forma de ranura. Por medio del prisma *6* la luz se refleja a la superficie del canal estrecho de la zona activa del reactor nuclear. Los rayos reflejados del objeto inciden sobre el prisma *6*, sufren una reflexión y se envían al haz regular de fibras *8*. La distancia (juego) entre el extremo de entrada del haz *8*, a través del prisma, y el objeto es igual a 0,15—0,20 mm. La imagen en el extremo de salida del haz *8* se registra en la película fotográfica *1* por medio del objetivo *9*. La exploración del objeto se efectúa por medio de la introducción constante en el canal *7* de los haces planos *5*, *8* unidos en paralelo. Esta cámara ha dado buenos resultados en los ensayos prácticos realizados con ella, permitiendo fijar señales insignificantes y defectos relativamente grandes de la superficie interna del canal.

Ejemplos de instrumentos con conductos de luz de la segunda clase. De la enorme variedad existente veamos sólo unos cuantos instrumentos con elementos fibrosos de la segunda clase.

Pantallas fibrosas. En la fabricación optomecánica de instrumentos se emplean ampliamente las pantallas de difusión de luz a base de los vidrios opalinos o mateados y las pantallas enceradas (fig. 70, *a*): la imagen del objeto se proyecta sobre la pantalla *2* por medio del objetivo *1* y se observa en el lado opuesto de ésta. La radiación comprendida dentro del ángulo $2u_1$ incide sobre la pantalla y después de ser difundida por ésta sale en todas las direcciones en un ángulo $2u_2 = 180°$, es decir, que la mayor parte de la luz se difunde inútilmente y no llega hasta el observador, el cual generalmente se encuentra en los límites de un ángulo $2u_2 = 40 \div 90°$. La imagen se percibe como de baja iluminación. Debido a esta difusión de luz el coeficiente de transmisión de contraste y el poder resolutivo en las pantallas clásicas son relativamente bajos; por tal razón, en los últimos años en lugar de éstas se están empleando pantallas de fibras *3* (fig. 70, *b*): gracias a la direccionalidad de la indicatriz de distribución de la luz (los rayos están comprendidos en un ángulo no mayor de $2u_0$) la imagen es captada como altamente iluminada; un alto contraste se logra mediante los revestimientos de absorción de luz de los filamentos, lo que es imposible lograr en las pantallas clásicas, y la organización y monodireccionalidad de los granos de difusión (o sea, de los filamentos conductores de luz) conduce a un aumento de 8 a 10 veces del poder resolutivo de las pantallas de fibras en comparación con las clásicas. Si hay necesidad de una transformación espectral de la radiación en estos sistemas la cara de entrada de la pantalla de fibras se recubre con un lumino-

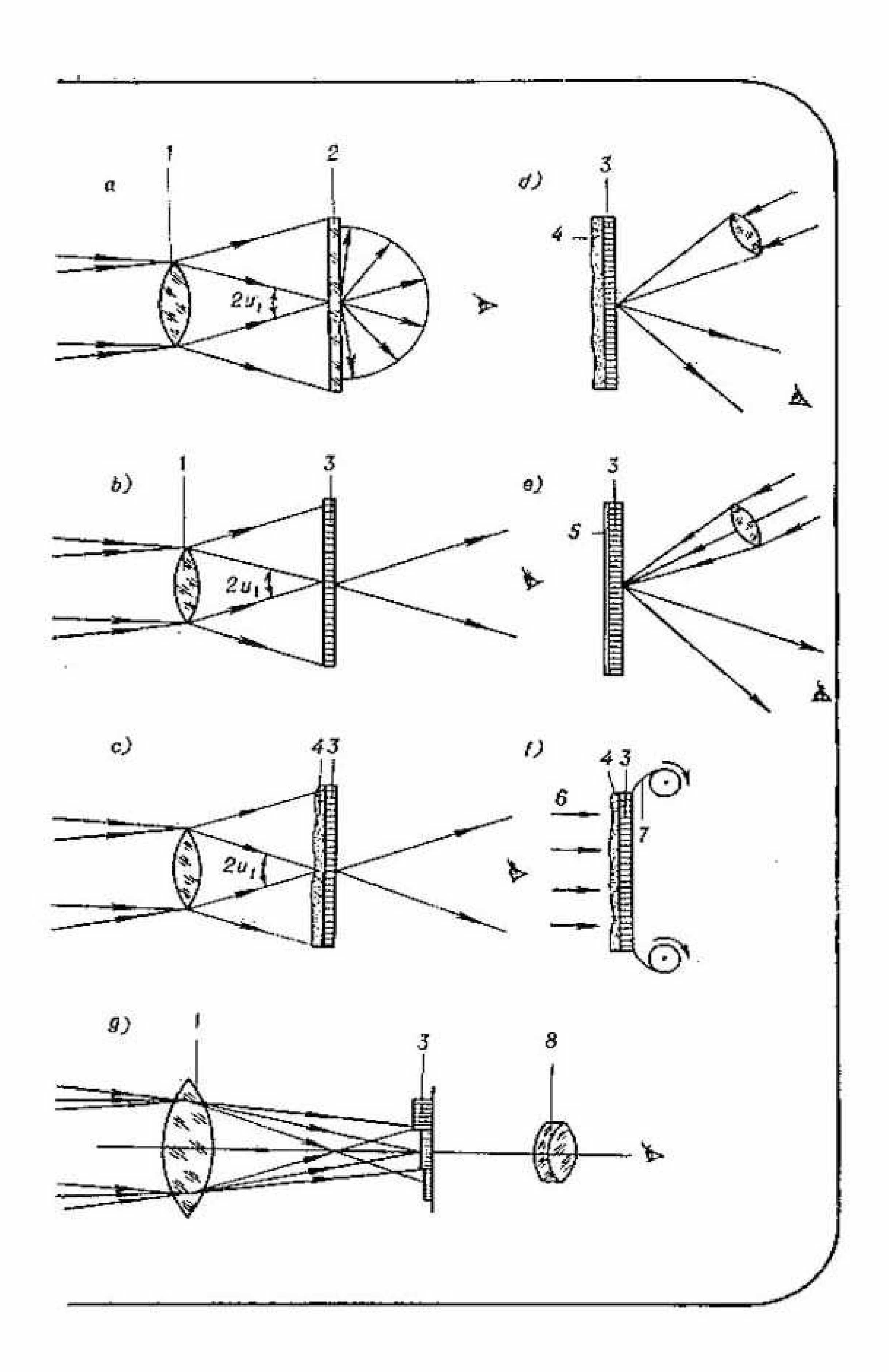
foro *4* (fig. 70, *c*). En último caso las pantallas de fibras pueden ser utilizadas como transparentes (fig. 70, *c*) o como reflectoras (fig. 70, *d*). Para la obtención de pantallas reflectoras de fibras se aplica también el recubrimiento metálico brillante *5* a la cara de placas de fibras (fig. 70, *e*).

El esquema de la fig. 70, *f* se emplea en las fotocámaras de fibras para la fotografía en *rayos X*. El luminóforo transforma los rayos X *6* en luz visible, la cual se transmite por medio de la pantalla de fibras a la emulsión de la película *7* que se encuentra en contacto con la otra cara de la placa (fig. 70, *f*). La fotografía y la filmación rápida en los rayos X invisibles permiten investigar procesos de soldadura eléctrica, el trabajo de contactos eléctricos dentro de los bloques herméticos, el comportamiento del fusible eléctrico, la distribución de las masas y velocidades de partículas en las toberas de los cohetes durante la combustión y otros procesos complejos de transcisión rápida.

En la fig. 70, *g* se representa un indicador fibroso de nitidez de la imagen, compuesto por la pantalla de fibras *3* con superficie delantera escalonada y superficie posterior lisa. El objetivo *1* proyecta sobre las caras de las pantallas la imagen del objeto. Por medio de la lupa *8* el observador ve la imagen con varios grados de nitidez. Desplazando el objetivo en el plano de las pantallas se introducen diferentes zonas de imagen. El plano de la pantalla de fibras que corresponde a la mayor nitidez, se hace coincidir con el plano de la placa fotográfica. Si se calcula el grosor de las pantallas de fibras de modo que el objetivo dé una imagen nítida de los objetos, situados a distancias determinadas, sobre la superficie de determinada pan-

——→

FIG. 70. Principios fundamentales del empleo de elementos fibrosos de segunda clase



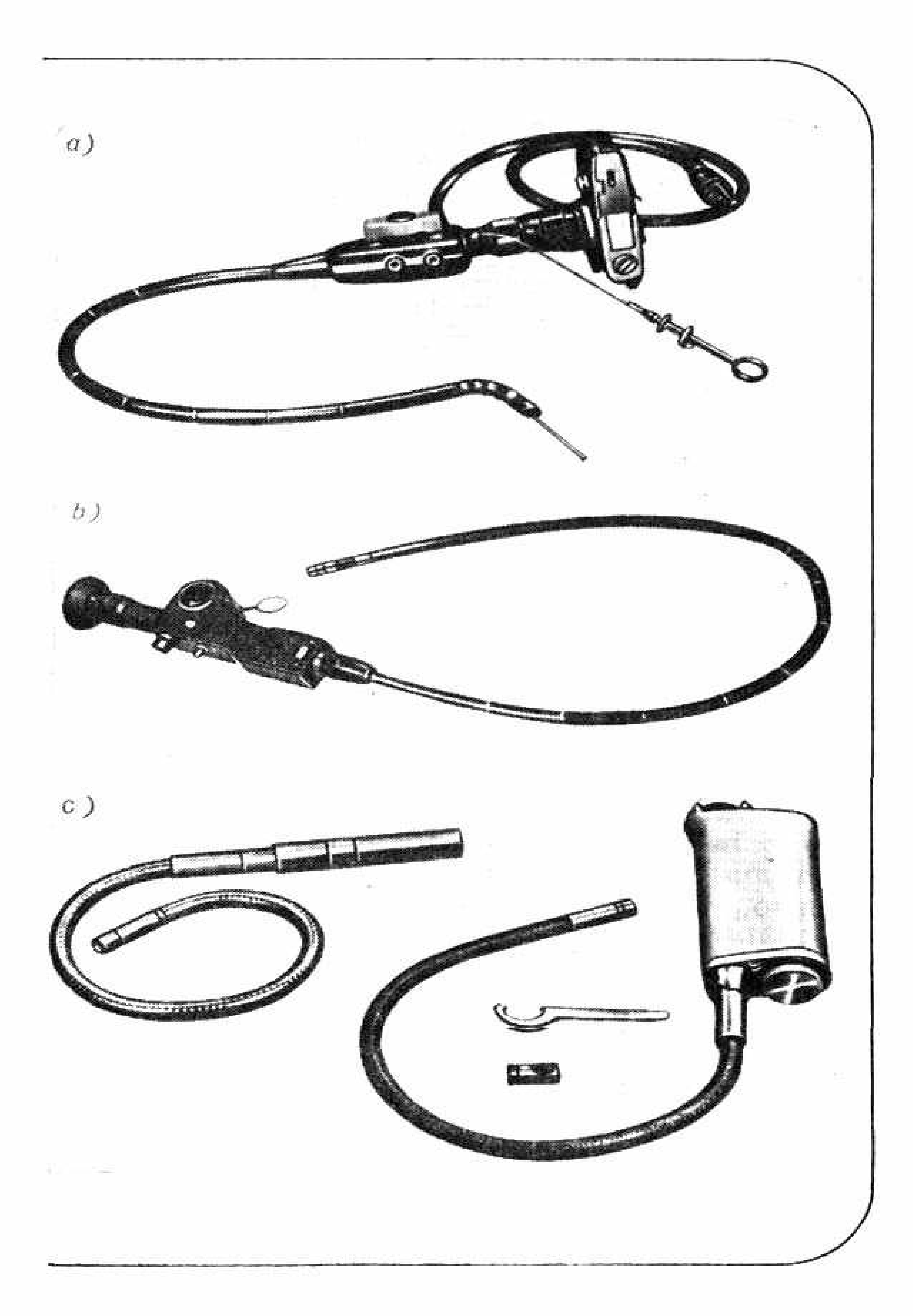
a
1
2
$2u_1$
d)
3
4
b)
1
3
$2u_1$
e)
3
5
c)
4 3
$2u_1$
f)
4 3
6
7
g)
1
3
8

talla, este indicador se puede utilizar en calidad de telémetro óptico.

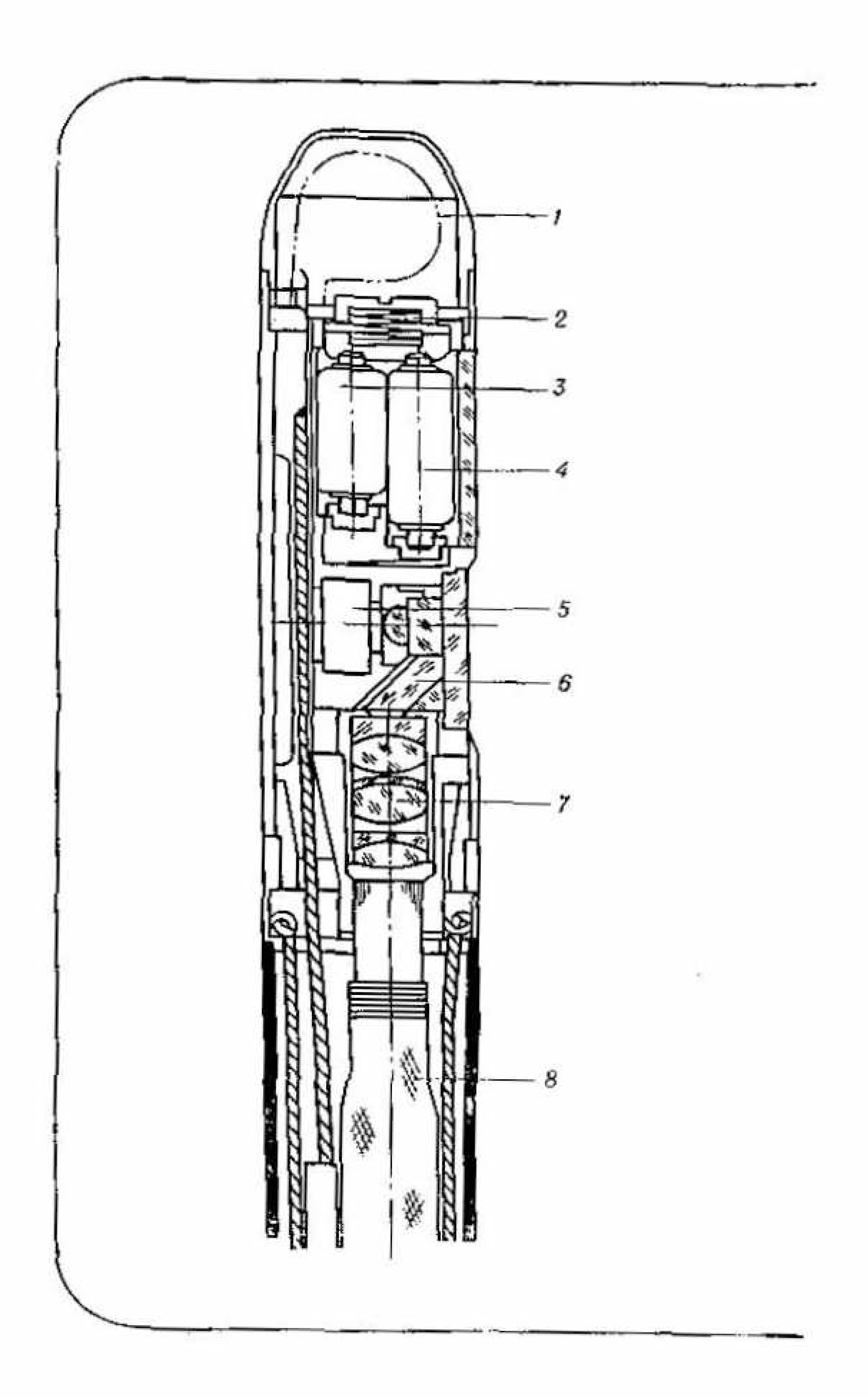
Conductos de luz en la endoscopia para medicina. Los dispositivos endoscópicos están destinados al examen visual de superficies y objetos internos situados en lugares de difícil acceso. La flexibilidad del canal, las pequeñas dimensiones transversales, el poder resolutivo lo suficientemente alto, da posibilidad de transmitir la imagen independientemente del grado de curvatura y torsión, las longitudes relativamente grandes y otras cualidades más de los haces flexibles regulares de fibras los hicieron elemento fundamental prácticamente de cualesquier endoscopios. En la actualidad la endoscopia médica e industrial se ha convertido en una de las ramas de la fabricación óptica de amplio y rápido desarrollo. El endoscopio para medicina con haces de fibras en paralelo de la primera y segunda clases (fig. 56) está resolviendo muchos problemas de diagnóstico. Veamos tres tipos de endoscopios para medicina.

El endoscopio esofágico o esofagoscopio está destinado para la inspección y fotografía por medio de una cámara fotográfica externa (fig. 71, *a*) de las diferentes sectores del esófago. Para la iluminación de las paredes internas, se transmite, por medio de un haz de fibras flexible irregular, luz fría de fuerte intensidad. La fotografía exterior exige del haz de fibras flexible regular altas cualidades en cuanto a la transmisión de luz, la neutralidad de ésta en el intervalo de longitudes de ondas entre 0,4 y 0,8 μ (para la obtención de fotografías en colores de alta calidad) y en cuanto al poder resolutivo. El esofagoscopio tiene el microobjetivo dispuesto en un terminal flexible mandado distal, el cual puede girar a determinado ángulo si es necesario, de tal forma

FIG. 71. Endoscopios flexibles fibrosos



a)
b)
c)


1
2
3
4
5
6
7
8

que durante la observación no queden «zonas ciegas» que tienen lugar al realizar la inspección con los endoscopios clásicos y además se facilita la «puntería» de la biopsia, o sea, extirpación de cuerpos homogéneos. En un tubo de 10—13 mm de diámetro se incluyen también canales para bombear aire a presión a la cavidad a observar con el fin de hacer indoloro el proceso de introducción, para ciertos mecanismos de teledirección del terminal, de limpieza de lentes y para las pinzas biópsicas. El bloque de teledirección se encuentra en el extremo exterior del dispositivo. La cámara fotográfica se puede sustituir fácilmente por el ocular.

La gastrocámara está destinada para la fotografía de las paredes internas del estómago (fig. 71, *b*) con la ventaja sobre los gastroscopios clásicos de que la fotografía se realiza no a ciegas. La gastrocámara contiene un haz regular flexible de fibras con un ocular en el extremo externo y un objetivo en el extremo distal. El haz está destinado *sólo* para localizar el lugar necesario, por lo que las exigencias respecto a las características ópticas de estos haces son menores que en el caso anterior de fotografía exterior. Una microcámara fotográfica se encuentra montada en el extremo distal del gastrocámara (fig. 72). La iluminación de las paredes estomacales se efectúa por medio de lámparas eléctricas, dispuestas también en el extremo distal del endoscopio. El médico al observar al paciente por medio del haz de fibras no sólo ve y escoge el lugar en el estómago que debe fotografiar, sino que además puede hacer girar la cámara y variar la distancia focal nece-

FIG. 72. Esquema de una microcámara fotográfica montada en el extremo distal de la gastrocámara fibrosa: *1*—chasis; *2*—portalámpara; *3*—lámpara para la colimación; *4*—lámpara de flash para fotografiar; *5*—cámara fotográfica; *6*—prisma de colimación; *7*—objetivo; *8*—haz flexible regular de fibras

saria, con lo que obtiene las fotos de los lugares que le interesan. La gastrocámara mencionada puede tomar 32 fotografías seguidas. El empleo de haces de fibras ha anulado la existencia de zonas estomacales no visibles.

El cistoscopio está destinado para la investigación de la vejiga urinaria del hombre; en él se utiliza un conducto de luz multifilar recto y rígido. La imagen es proyectada al extremo de entrada del conducto de luz por medio de un microobjetivo a través de un prisma si la observación es lateral y sin prisma si la observación es directa; el extremo de salida se observa a través del ocular.

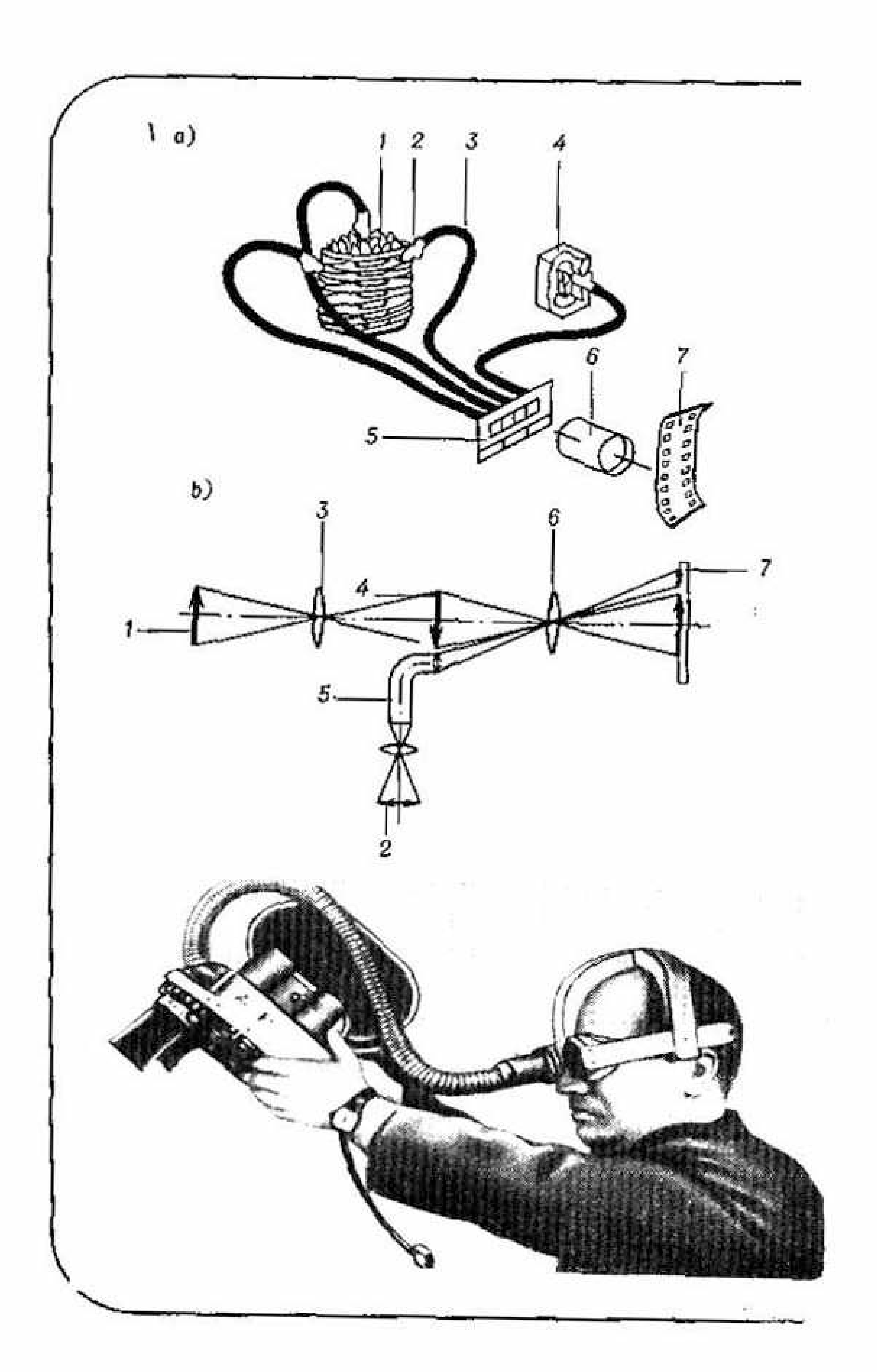
Endoscopia técnica. Diferentes endoscopios de haces fibrosos se emplean para la observación de las paredes internas de tubos y cavidades en la fabricación de maquinarias y en diferentes experimentos de laboratorio: examen de las cámaras de combustión, estado de tubos de radio y de cabezas de combate, detección de un diente roto en una caja de cambio de velocidades, revisión del estado de tornillos, disminución del tiempo de control técnico, lectura de inscripciones e información de instrumentos, etc. Todo esto disminuye el tiempo necesario para la inspección técnica. En la gran mayoría de endoscopios técnicos utilizables no hay peligro de «quemaduras» (excepto el caso de endoscopia de los objetos inflamables y explosibles), como esto suele ocurrir en la medicina. Debido a esto, en los endoscopios técnicos la iluminación se efectúa por medio de una lámpara eléctrica empleando el haz de fibras flexible regular sólo para la transmisión de la imagen. En la fig. 71, *c* se representa el aspecto externo de un endoscopio técnico.

La conexión en paralelo de haces en la endoscopia técnica permite tomar a la vez fotografía y filmación de varios puntos del objeto estudiado

(fig. 73, *a*). Sobre el cilindro del motor *1* se fijan los colimadores *2*, cuyos lentes enfocan la imagen de luminiscencia en la cámara de combustión del motor sobre los extremos de los conductos de luz *3*. Al mismo tiempo se registra la luminosidad por medio de una fuente de luz calibrada *4*. Todos los extremos de salida de los conductos de luz se colocan en un plano y forman el cuadro *5*. Por medio del objetivo *6* de la cámara cinematográfica se efectúa la transmisión de la imagen de un cuadro a una película cinematográfica *7*.

Debido a que la cámara durante la filmación debe desplazarse, aparece una serie de dificultades. Es imposible filmar bajo algunos ángulos de toma. Por ejemplo, es imposible filmar por encima de un grupo de personas si la cámara se encuentra junto a ellas ni tampoco rodar una película por debajo de un caballo en carrera. La fibroóptica ha hecho de las cámaras filmadoras y de los operadores cinematográficos «temerarios» y «omnividentes». A la cámara cinematográfica se acopla un haz flexible de fibras (fig. 74), de tal forma que la imagen del objeto llega a un mismo tiempo al objetivo de la cámara y al haz. La imagen en la salida de este último por medio de un espejo de inversión y el ocular se observa por el operario.

El ocular del visor de fibras se fija en el casco. Una cámara cinematofráfica de este tipo puede fijar los trucos más inesperados: puede filmar de debajo de las ruedas de un tren en movimiento, de un auto, etc. Entre tanto, el operador puede observar tranquilamente a través del visor sin exponerse a ningún riesgo. El operador teniendo tal cámara filmadora con un visor de fibras puede enviarla, según se dice, contra viento y marea. Si se acopla un visor de fibras de longitud necesaria a una cámara de control remoto se puede filmar en el exterior de la cabina de un



1 a)
1
2
3
4
5
6
7
b)
3
6
4
7
1
5
2

FIG. 73. Conexión en paralelo de haces en la endoscopia técnica

←—

automóvil, avión, nave cósmica, manteniéndose entretanto dentro de la cabina.

Frecuentemente, durante una filmación es necesario fijar a un mismo tiempo la imagen del *objeto 1* (fig. 73, *b*) y del *objeto patrón 2*, como son marcas, números de los cuadros, fechos y lugares de filmación, inscripciones, etc. Empleando haces de fibras de la segundo clase este problema se resuelve con relativa facilidad. Uno de los posibles esquemas viene dado en la fig. 73, *b*: el objetivo *3* forma una imagen transitoria del objeto en el plano *4*, con el cual está on coincidencia el extremo de salida del haz regular de fibras *5*. La imagen del objeto y del objeto patrón por medio del objetivo *6* se proyecta al mismo tiempo en el plano *7* de la película fotográfica. El método de transferencia de la imagen del objeto patrón por medio de un haz de conductos de luz es uno de los más difundidos en la construcción de instrumentos. En ambos esquemas representados en la fig. 73 se emplea este método.

Elementos de fibras en la holografía. En el párrafo 10 hemos examinado la utilización de los conductos de luz en la holografía (fig. 64). Los elementos de fibras permiten en gran medida simplificar la construcción de interferómetros holográficos utilizando en una de sus ramas (de trabajo, de referencia o ambas a la vez) conductos de luz. De esta forma se disminuyen el número de elementos necesarios, las dimensiones y el peso del instrumento, aumentando su luminosidad. La ventaja fundamental de los conductos de luz, al ser utilizados en la holografía consiste en la

←—

FIG. 74. Visor flexible de fibras para una cámara cinematográfica

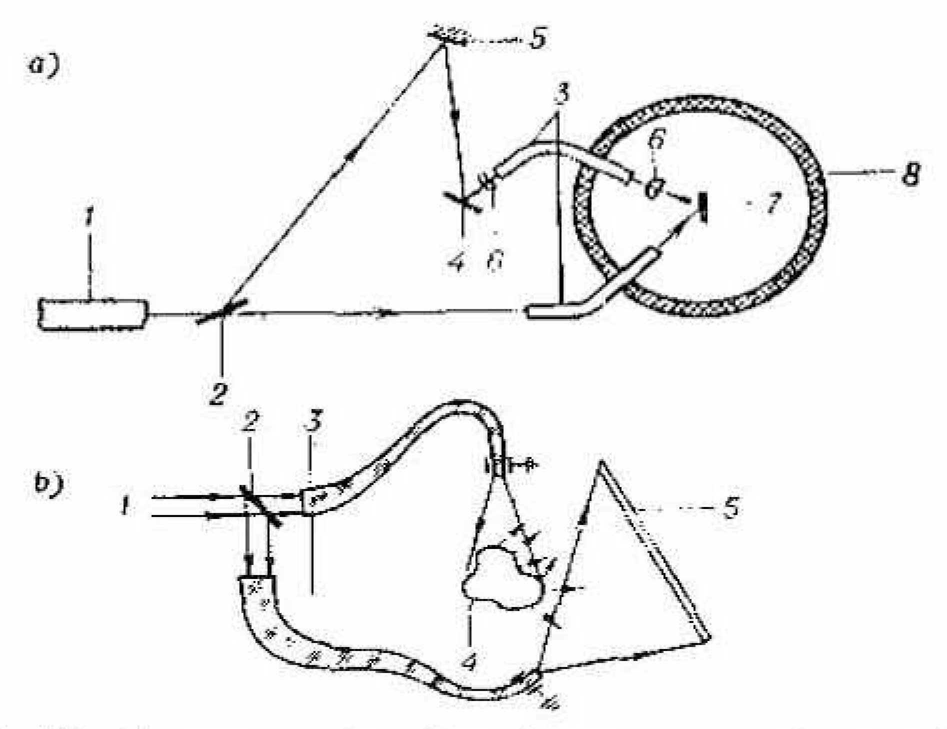


FIG. 75. Esquemas de dispositivos para obtener hologramas de los objetos de difícil acceso

ampliación de los métodos interferenciales de investigación: estudio de objetos y cavidades de difícil acceso, simplificación en la filmación de interferogramas de objetos bajo diferentes ángulos de fijación (lo que es importante sobre todo, cuando se trata de investigación de formas complejas heterogénas). Esto da la posibilidad de obtener en una misma placa fotográfica y con un haz de referencia común varios hologramas correspondientes a diferentes ángulos de fijación.

En la fig. 75, *a* está representado el esquema de obtención de hologramas del objeto *7*, por medio de dos haces flexibles de fibras *3*, que se encuentra dentro de una cámara de difícil acceso *8*. La radiación del láser a gas *1* se divide en dos haces por medio de la placa divisora *2*, incidiendo el haz de rayos de referencia directamente sobre la placa fotográfica *4* después de reflejarse del espejo *5*. El haz de rayos de trabajo se dirige por medio de un haz flexible de conductos de luz al

objeto 7 y después de su reflexión por éste incide sobre la placa fotográfica a través de los lentes 6 y el segundo haz de fibras flexible regular; en esta placa, luego de la interferencia de los haces de trabajo y de referencia se obtiene el holograma del objeto 7. En los esquemas semejantes, cuando no hay requerimientos en cuanto a la flexibilidad, con igual éxito se pueden emplear los conductos de luz polifilares regulares y rígidos; estos últimos pueden alcanzar la curvatura necesaria por medio de un tratamiento térmico. La calidad informativa de los hologramas no se empeora si cambia la curvatura y torsión alrededor del eje de los haces de conductos de luz.

En la fig. 76 se observa un interferograma de llama del infernillo, el cual ha sido obtenido por ayuda del haz regular flexible de fibras dispuesto en la sección de trabajo (fig. 76, *a*) y en la sección de referencia (fig. 76, *b*) del interferómetro holográfico.

En la fig. 76 se puede observar que la calidad óptica de los conductos de haz, utilizándolos en la sección de trabajo del interferómetro es considerablemente mayor que en el brazo de referencia: los defectos en los extremos de los haces se reflejan en la imagen obtenida en forma de grietas.

Como puede deducirse de la fig. 75, la luz difundida por el objeto 7 es concentrada por los lentes 6 en el extremo del haz, o sea que la imagen se proyecta con disminución. En estos esquemas de utilización de los haces de fibras regulares el grado de disminución admisible de la imagen de un objeto está limitado por el poder resolutivo de los elementos fibrosos.

Elementos fibrosos en los tubos de rayos catódicos. De todo el gran conjunto de dispositivos optoelectrónicos de diferentes tipos empleados en la actualidad con éxito y alta efectividad construidos a base de los elementos fibrosos, veamos

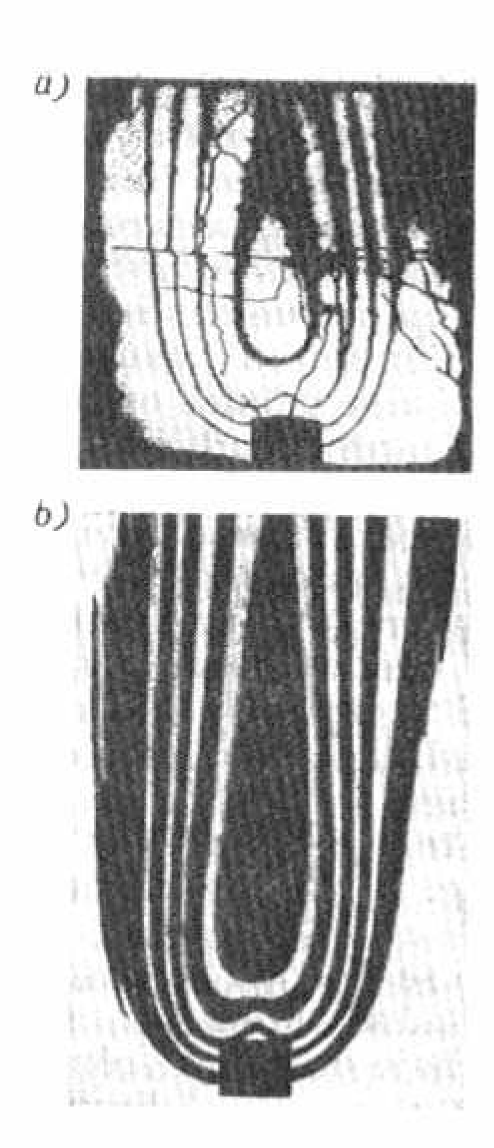


FIG. 76. Interferograma de la llama de un infernillo

los tubos de rayos catódicos receptores, llamados también cinescopios.

El cinescopio es una ampolla de vidrio o metal herméticamente cerrada al vacío cuya cara frontal *2*, por la superficie interior, está recubierta de un luminóforo *1*, el cual sirve de fuente de difusión de la luz (fig. 77, *a*). El rayo electrónico de exploración *8* al incidir sobre este último da origen a una imagen del diámetro entre 10—200 μ. Si sobre un cinescopio de este tipo se coloca una película fotográfica, no se obtiene ninguna imagen, puesto que está separada de la fuente

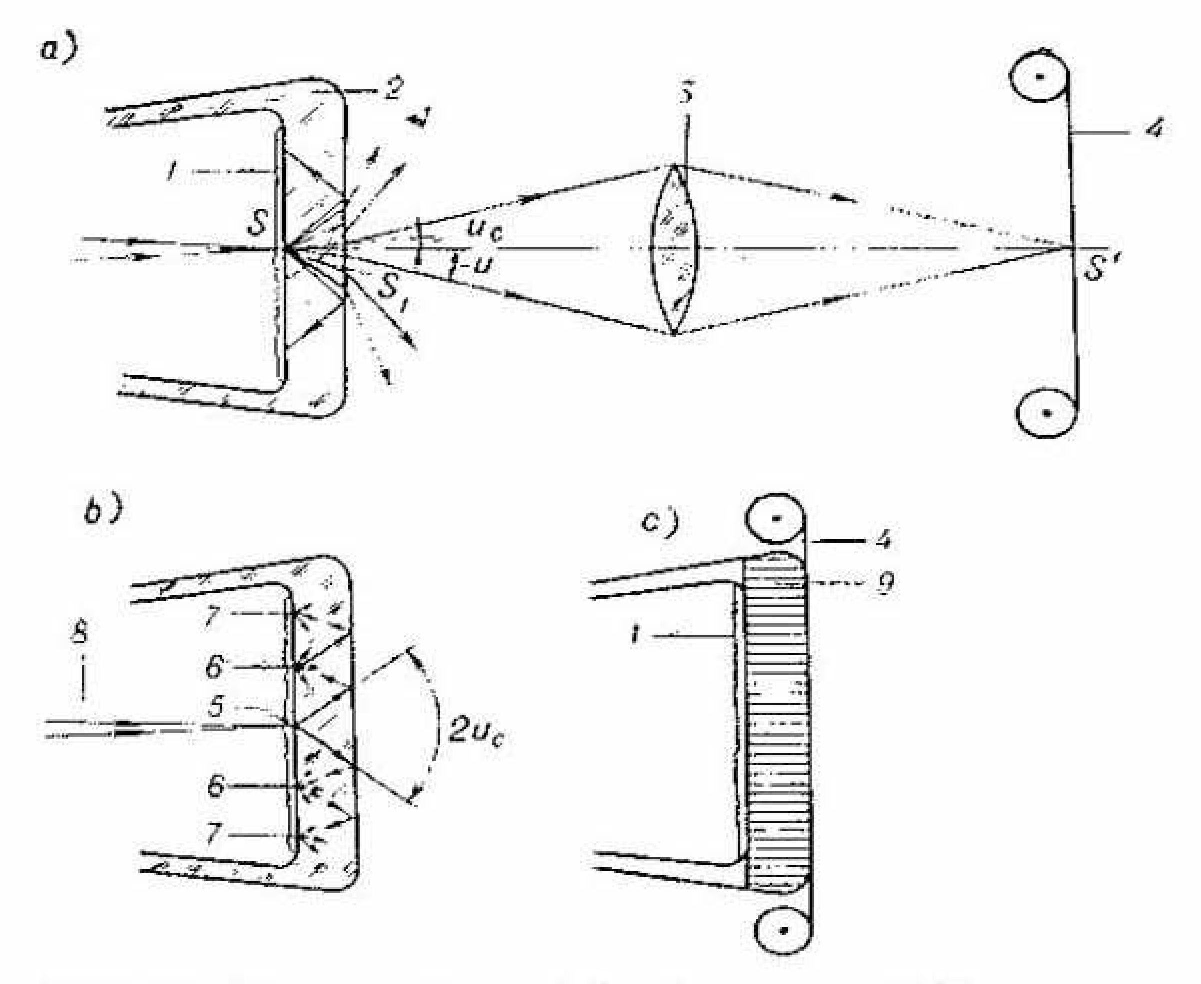


FIG. 77. Esquema de un tubo de rayos catódicos

luminiscente por un vidrio de grosor relativamente grande. Para fijar la imagen de la pantalla del cinescopio se utiliza una cámara fotográfica, por medio de la cual el objetivo *3* concentra la imagen sobre la película *4*. Sin embargo, el contraste de la imagen (y, por consiguiente, el poder resolutivo del cinescopio) resulta bajo.

La causa de este efecto son los llamados halos (fig. 77, *b*): la emisión difusiva del luminóforo se difunde por la capa potente de la ventana de vidrio, los rayos comprendidos en un ángulo igual a $2u_c = 2$ arcsen $\frac{1}{n_c} \approx 80°$, al salir del vidrio, cubren todas las direcciones en el aire a un ángulo de 180°. De tal modo, más de la mitad de la luz

emitida por el luminóforo se transforma en halos. Los rayos incidentes a un ángulo mayor que u_c se reflejan de nuevo hacia el luminóforo provocando su luminiscencia. Como resultado se forma alrededor de la imagen de la mancha *5* el halo luminiscente *6* del cual surgen los halos secundarios *7* más débiles y así sucesivamente. El radio r del primer halo, para un grosor de la ventana de vidrio d, es igual a $r=2d \operatorname{tg} u_c$. Generalmente el diámetro del primer halo es de 20 mm puesto que el grosor del vidrio no puede ser menor de una magnitud determinada por sus propiedades de rigidez.

Los halos disminuyen considerablemente el contraste. Para aumentar su magnitud se emplea un vidrio neutral semitransparente (recuerden los recubrimientos aisladores de luz semitransparentes utilizados en la fibroóptica) en calidad de material para el vidro frontal, teniendo un coeficiente de transmisión de luz 0,6—0,7. Esto permite aumentar el contraste de la imagen en algunas veces. El aumento del contraste en este caso se explica por el traspaso doble, a través del vidrio, de los rayos que generan los halos: desde el luminóforo hacia la superficie externa y atrás, mientras que los rayos que salen atraviesan el vidrio sólo una vez, o sea, los rayos de los halos se atenúan en más de dos veces que los rayos emergentes. El brillo de toda la imagen en este caso disminuye, lo que hay que compensar aumentando el flujo del rayo electrónico *8*.

Como se puede observar en la fig. 77, *a*, no todos los rayos salientes de la pantalla del cinescopio pueden ser captados por el objetivo *3*; parte de éstos pasan de largo. Si se emplea un objetivo de especial luminosidad se puede aumentar la cantidad de rayos captados, pero siempre será menos del 100% de los rayos emergentes; entre otras cosas, esto implica un aumento

significante de las dimensiones y complejidad de construcción del dispositivo de fotografía. Si se emplea un objetivo suficientemente luminoso con una abertura relativa 1 : 1 y que trasmita la imagen a la película con un aumento igual a 1, el ángulo del rayo extremo en el vidrio que puede ser captado por el objetivo no es más de 8—9°. Teniendo en cuenta todas las causas de pérdidas de rayos luminosos, entre ellas las relacionadas con el material del objetivo, se puede demostrar que sólo el 1—2% de toda la emisión luminosa del luminóforo desde el punto S llega hasta el punto S', es decir, que el *rendimiento luminoso* para este método de fotografía de la imagen directamente de la pantalla del cinescopio, es menor del 2%.

Los cinescopios clásicos, además de las desventajas indicadas, se caracterizan también por el *paralaje*; la imagen del punto S bajo este efecto parece encontrarse no en el lugar verdadero, sino en una posición S_1 (fig. 77, *a*).

La fibroóptica ha efectuado un perfeccionamiento de los cinescopios auténticamente revolucionario. Esto ocurrió cuando en calidad de ventana de vidrio frontal fue empleada una pantalla de fibras (fig. 77, *c*): la imagen formada en el luminóforo se trasmite por los filamentos de conductos de luz a la superficie exterior de la lente de fibras. Cada uno de los filamentos, para $A_0 \gg 1$, deja pasar prácticamente toda la radiación del luminóforo la cual incide totalmente en la película *4*, en contacto con la cara de salida de la pantalla de fibras, o sea, el rendimiento luminoso del filamento unitario es de cerca del 100%, lo que es 50 veces mayor que en el método clásico de fotografía. En general, para la pantalla de fibras, teniendo en cuenta que está constituida de fibras, el rendimiento luminoso es igual a $\tau_5 \times$ $\times 100\%$. Supongamos que $\tau_5 = 0,7$; entonces el

rendimiento luminoso de toda la pantalla es el 70% y 35 veces mayor que el rendimiento del sistema clásico.

El registro fotográfico de contacto de la imagen ha disminuido considerablemente las dimensiones del sistema, unas cuantas decenas de veces ha aumentado su luminosidad, o sea, la brillantez de la imagen. Esto ha permitido aumentar en igual número de veces la velocidad de grabado fotográfico, el contraste y la frecuencia de resolución. Los cinescopios de pantallas frontales de fibras están libres de paralaje. La calidad de la imagen ha aumentado también gracias al aumento brusco del número de elementos: 250 000 elementos en la imagen de televisión común y varias decenas de millones de elementos (filamentos conductores de luz) en la pantalla de fibras.

Si al pasar del cinescopio clásico a un tubo de pantalla de fibras no se plantea como tarea principal un aumento notable del brillo de la imagen, sino que se prevé solamente un aumento del poder resolutivo, a base de la alta luminosidad de la pantalla se puede lograr una ganancia en los parámetros eléctricos del cinescopio: aumentar la velocidad de exploración, disminuir la tensión del electrodo acelerador, disminuir la corriente de trabajo en el rayo electrónico, atenuar la quemadura del luminóforo, disminuir la potencia empleada en los esquemas de desviación del rayo, reducir la radiación de rayos X del tubo, parásitos y perjudiciales para la salud del hombre, y muchas cosas más.

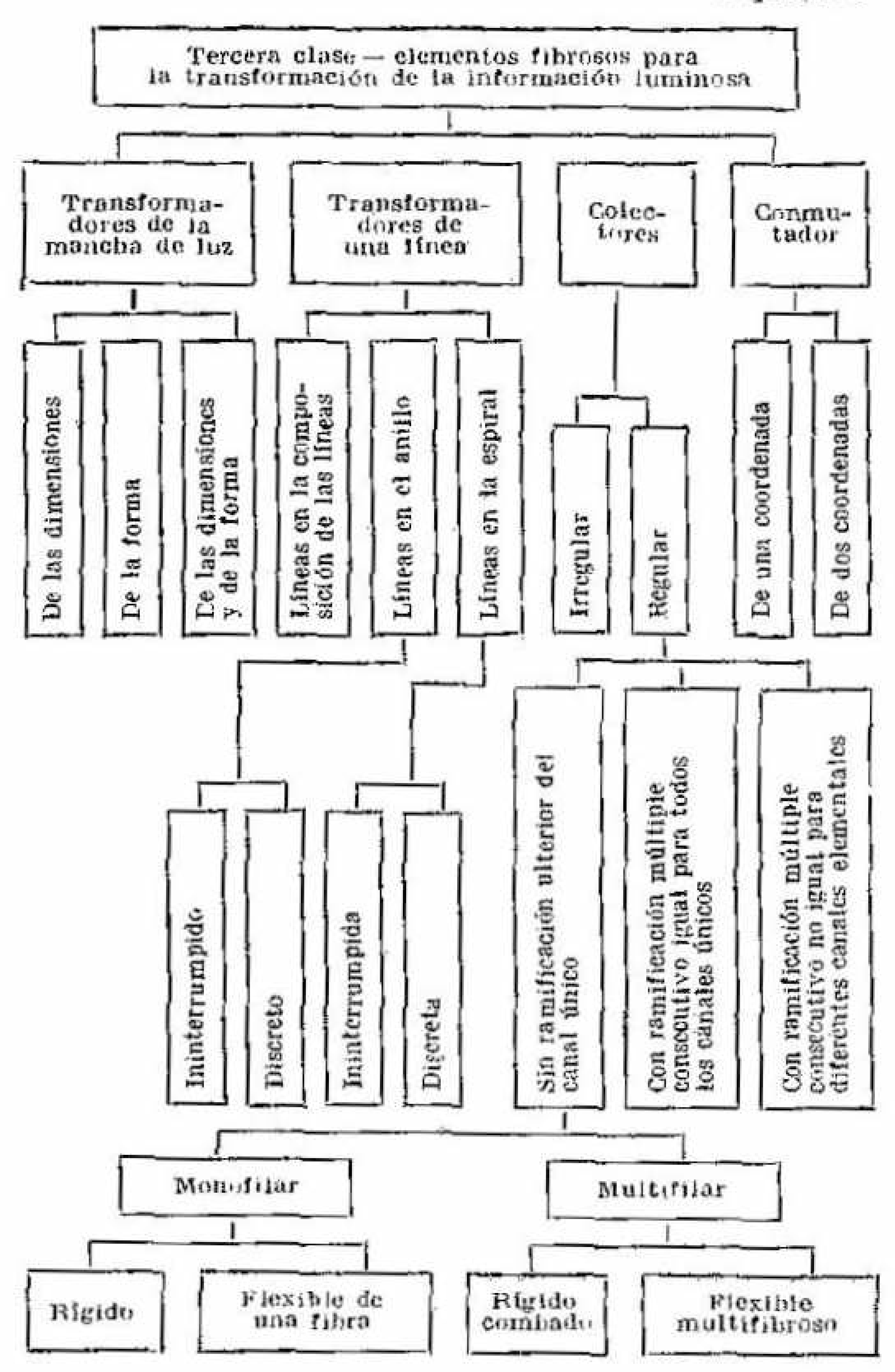
Los especialistas consideran que uno de los campos para nuevas aplicaciones de los cinescopios de pantallas de fibras será la televisión de uso doméstico, donde estos tubos permitirán un aumento de la calidad de la imagen y ver programas en condiciones de iluminación diurna.

12. TERCERA CLASE: ELEMENTOS FIBROSOS PARA LA TRANSFORMACION DE LA INFORMACION LUMINOSA

Los elementos fibrosos de la tercera clase (esquema 3) están destinados para la transformación — transmisión y conversión de la información luminosa desorganizada, de señales luminosas, etc., es decir, de información no en la forma de imagen óptica común. Como se puede observar en la tabla 6, esta clase de elementos fibrosos son los que tienen en la actualidad mayor difusión en la fabricación de instrumentos: más del 60 % de todos los tipos de los sistemas de conductos de luz empleados y en proyección. Estos elementos fibrosos de esta clase han permitido utilizar una serie de principios constructivos en la transmisión, almacenamiento y reproducción de la información, así, por ejemplo, los principios de inversión de la imagen, nuevos métodos de exploración alternativa y giratoria, la división de la información en elementos según una ley prefijada, la variación de las dimensiones y formato de la imagen, la codificación y descodificación de información, la transformación de la señal luminosa en forma más cómoda para la exploración por medio de dispositivos simples durante la búsqueda y seguimiento automático y muchos otros más. Por regla general, los sistemas a base de los conductos de luz, además de las propiedades anteriores para la transformación de la información luminosa, se caracterizan por su compactibilidad, peso ligero, fiabilidad de funcionamiento, reglaje y explotación simple de los dispositivos y otras ventajas más.

Sin embargo, no solamente por estas cualidades se puede explicar la alta difusión de los conductos de luz de esta clase y su empleo cada vez más amplio en nuevos tipos de transformadores de

Esquema 3



Tercera clase — elementos fibrosos para la transformación de la información luminosa
Transformadores de la mancha de luz
Transformadores de una línea
Colectores
Conmutador
De las dimensiones
De la forma
De las dimensiones y de la forma
Líneas en la composición de las líneas
Líneas en el anillo
Líneas en la espiral
Irregular
Regular
De una coordenada
De dos coordenadas
Ininterrumpido
Discreto
Ininterrumpida
Discreta
Sin ramificación ulterior del canal único
Con ramificación múltiple consecutivo igual para todos los canales únicos
Con ramificación múltiple consecutivo no igual para diferentes canales elementales
Monofilar
Multifilar
Rígido
Flexible de una fibra
Rígido combado
Flexible multifibroso

fibras de información. La causa fundamental radica en la resolución de una serie enorme de problemas de información de los cuales una gran mayoría o eran insolubles por métodos clásicos de la óptica, o eran solubles en principio, pero de una forma no muy acabada, con grandes dimensiones y peso, con un reglaje complejo de un número enorme de elementos ópticos y con bajos parámetros de salida, que no hubo posibilidad de su empleo.

Con los ejemplos que daremos a continuación, de algunos de los miles dispositivos existentes, se pueden demostrar las altas cualidades y ventajas de los transformadores de fibras en los cuales se utilizan con gran efectividad los sistemas de conductos de luz de la tercera clase. La optoelectrónica, los métodos de exploración automática, los sistemas de exploración, la cibernética técnica, los sistemas óptico-lógicos, la fabricación de instrumentos cósmicos y otras direcciones de la ciencia y la técnica se basan generalmente en los elementos conductores de luz.

En el ejemplo concreto de dispositivos veremos los tipos fundamentales de transformación de información desorganizada que se efectúa por medio de los elementos fibrosos de la tercera clase y familiarizándose de paso con algunos principios fundamentales de su utilización de la fabricación de instrumentos.

Variación de las dimensiones de una mancha luminosa. La transformación elemental efectuada por los elementos de la tercera clase es la variación de las dimensiones de una mancha luminosa conservando la semejanza geométrica de la forma de los extremos de los conductos de luz al cambiar la abertura de los haces de rayos. Los conductos de luz monofilares resueleven a su vez el problema de una iluminación promediada superficial del extremo de salida independientemente

de la distribución de la iluminación superficial en el extremo de entrada, lo que en la fabricación de instrumentos se utiliza para el alumbrado uniforme de una superficie expuesta a la irradiación como, por ejemplo, de la superficie fotosensible de un fotorreceptor. Los conductos de luz que en el trayecto del rayo van disminuyendo su sección concentran el flujo luminoso, incidente en el extremo de entrada, en el extremo pequeño, creando de esta forma una gran luminosidad de éste y aumentando así la abertura del haz de rayos emergentes del extremo pequeño. En dirección contraria al desplazamiento de los rayos ocurre una «difusión» de este flujo en la superficie grande, una disminución de la luminosidad y de la abertura de los rayos salientes del extremo. En los focones y foclines varían las dimensiones de las caras manteniendo una semejanza geométrica perfecta; en los anamórfotes se mantiene constante la dimensión de una sección transversal y la otra varía, o sea, que la forma de las caras de los extremos es cuasisemejante. Para compensar la dependencia entre la abertura de los conductos de luz y el radio de curvatura compleja de los conductos de luz de la tercera clase, al igual que en los conductos de luz de la primera clase, se utiliza la estructura multifilar. Los foclines y los anamórfotes se emplean frecuentemente en los dispositivos en forma enrollada.

En la fig. 75, *b* se representa el esquema de obtención de hologramas por medio de los conductos de luz, los cuales hacen variar las dimensiones de la mancha luminosa y la abertura del haz de rayos: la radiación *1* del láser después de dividirse en una placa divisora de luz *2* incide a través de los focones *3* sobre el objeto *4* y la placa fotográfica *5*. Los focones *3*, cuyo diámetro disminuye gradualmente, flexibles o rígidos, con un diámetro de salida de varios micrones, se

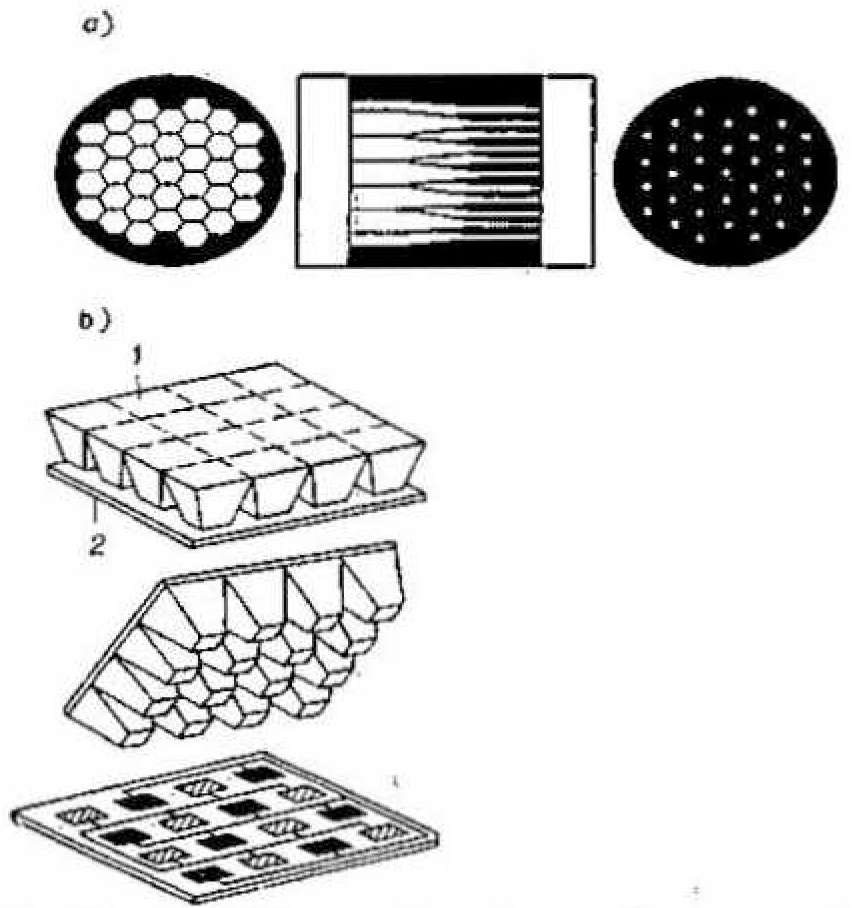


FIG. 78. Disector fibroso de información: *a* — división física de una imagen enteriza en puntos discretos; *b* — fotorreceptor mosaico de múltiples elementos con conductos de luz que transforman el tamaño de la mancha luminosa

disponen en las secciónes de referencia y de trabajo del sistema y desempeñan el papel de objetivo microscópico de diafragma puntual, dando a la salida prácticamente una onda esférica ideal. En ensanchamiento angular del haz de rayos es igual a la disminución del diámetro del extremo de salida con respecto al de entrada.

En la fig. 78, *a* se representa un disector fibroso de información, el cual físicamente divide en puntos discretos los campos adyacentes de una imagen plana enteriza: los conductos de luz del focón que están dispuestas en forma compacta en un extremo, se encuentran divididos en el

otro extremo, lo que facilita el problema de recepción o de exploración de la imagen.

En la fig. 78, *b* se representa la construcción de fotorreceptor de múltiples elementos, el cual consiste en un mosaico de elementos sensibles aplicados en una placa *2* y conectado en forma escaqueada.

Para evitar la influencia de intervalos no activos ocupados por los cables de conexión, se emplea el bloque *1* de conductos de luz piramidales, uno para cada elemento sensible. El extremo de entrada de cada conducto, de luz corresponde al diámetro de la mancha de difusión del sistema óptico y tiene las dimensiones de 0,26 × 0,26 mm; los extremos de salida corresponden a una pequeña superficie del elemento fotosensible y tienen las dimensiones de 0,13 × 0,13 mm.

Este tipo de fotorreceptores de múltiples elementos se emplea para resaltar blancos puntuales situados en el fondo de los objetos naturales de carácter continuo.

Transformación de la forma de una mancha luminosa. Los elementos fibrosos permiten realizar una transformación, prácticamente cualquiera de la forma geométrica compacta de la mancha luminosa, incluso reconstruyendo la forma de la mancha y formando símbolos, es decir, permiten la formación de objetos iluminados. En la fig. 79, *a* se representa la formación de la cifra «5» por medio de un haz flexible de fibras; en la fig. 79, *b*, la formación de un anillo luminoso que a su vez puede servir de letra «O» o de cifra «0»; en la fig. 79, *c*, la formación de la cifra «*1*». Al realizar la transformación de la forma de una mancha luminosa, las áreas de los extremos de los transformadores de fibras pueden ser iguales o pueden diferenciarse.

En la fabricación de instrumentos ópticos, para utilizar por completo la radiación en la re-

solución de muchos problemas se exige la transformación de la forma de una mancha luminosa conservando la magnitud de su área, por ejemplo, la transmisión de la radiación de una fuente estrecha y alargada (en rendija) a un fotorreceptor cuya área sensible suele tener una forma circular o cuadrada. Problemas semejantes se resuelven por medio de transformadores de la forma de la mancha luminosa tipo rendija — cuadrado (fig. 80) con iguales áreas de ambos extremos (caras). Estos transformadores, están destinados, en particular, para *recoger* la luz de una zona estrecha en rendija del campo *curvo* de un objetivo y transmitirla al fotorreceptor plano con pequeña área de la sección receptora. Además de la transformación de la forma de la mancha luminosa y de la concentración de la luz desde una rendija a un cuadrado, ellos también corrigen la curvatura del campo del sistema óptico anterior. Las dimensiones de los transformadores de fibras son generalmente pequeñas. Los colectores de luz de la fig. 80 tienen las siguientes dimensiones: el extremo en rendija, 0,9 × × 70 mm; el extremo cuadrado, 8 × 8 mm; la longitud a lo largo del eje óptico del conducto de luz elemental medio, cerca de 75 mm.

La transmisión de luz de los transformadores semejantes depende del relleno seccional del extremo de entrada por filamentos conductores de luz; de la transparencia de los vidrios componentes del filamento y el recubrimiento de los conductos de luz; de la calidad de la barrera divisora filamento — recubrimiento; de la abertura numérica de entrada y ángulo de deflexión de los extremos de los conductos de luz elementales. El empleo de los conductos de luz monofilares de diámetro entre 0,9 y 1,0 mm con el grosor mínimo admisible del recubrimiento aislador de luz y con compresión térmica de los extremos de los

FIG. 79. Transformadores de fibras de la forma de la mancha luminosa

——→

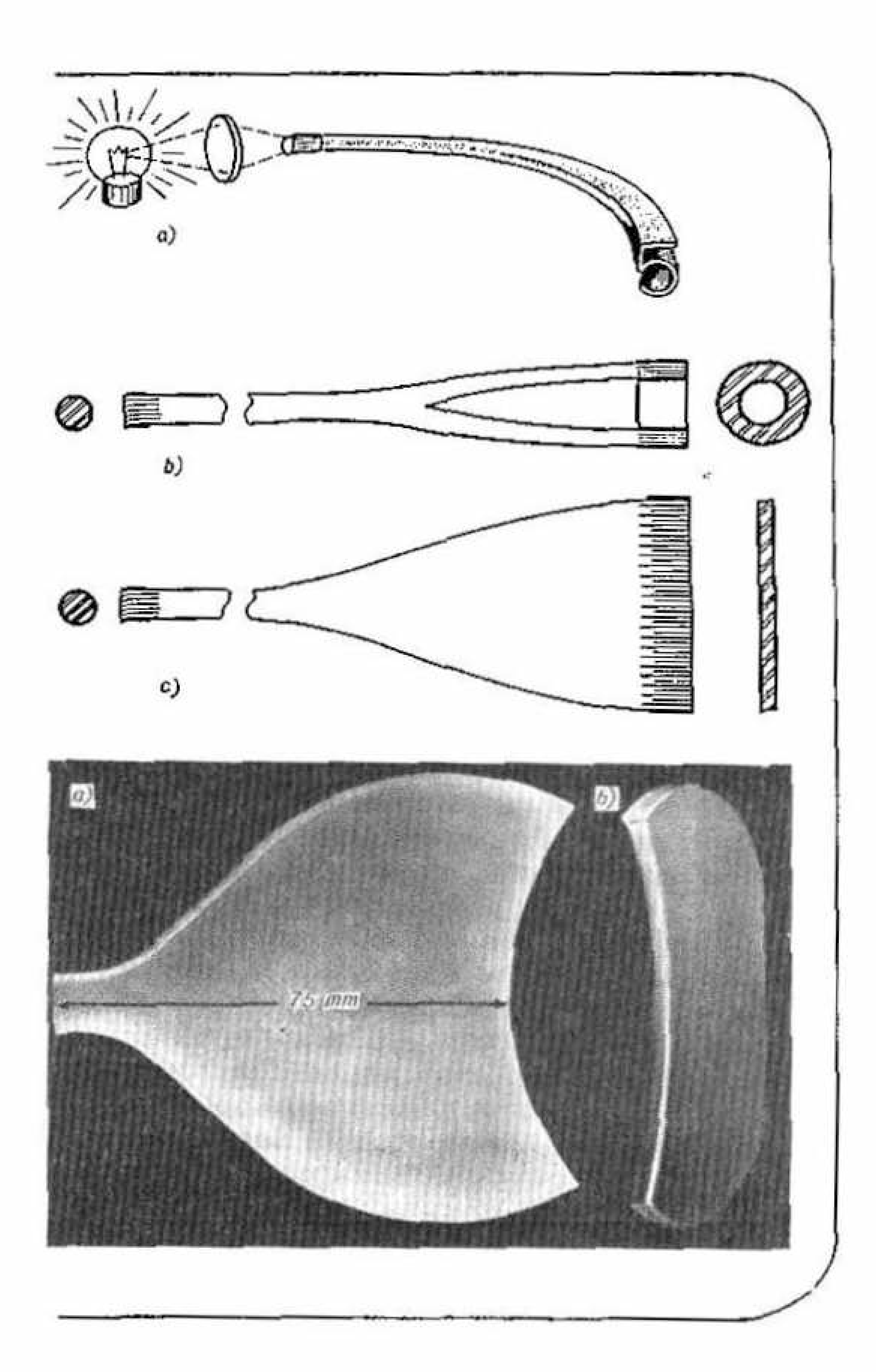
conductos, ha permitido realizar un relleno con filamentos del extremo en rendija del transformador de cerca del 95%. El empleo de los pares de vidrios de alta compatibilidad tecnológca han dado prácticamente una barrera divisora ideal filamento — recubrimiento. En estos transformadores los conductos de luz unitarios llegan a los extremos en forma perpendicular para que debido al ángulo de deflexión de los extremos no disminuya la abertura de éstos. Para la obtención de un transformador del tipo rendija — cuadrado son aceptables solamente los conductos de luz doblados flexibles y rígidos.

Otros transformadores de fibras semejantes se pueden emplear también en un régimen de transformación de mancha luminosa en rendija a una cuadrada o redonda de cualquier forma dada del extremo en rendija: cóncava, plana o convexa (fig. 81, *a*, *b*, *c*), en dependencia de la curvatura del campo anterior del transformador y siguiente de los sistemas ópticos. Es posible un proceso inverso (fig. 81, *d*).

El empleo de un transformador de fibras del tipo círculo — rendija fue propuesto por primera vez en 1939 por. S. Tolansky (Inglaterra). El dispositivo de iluminación empleado (fig. 81, *e*) permitió observar la garganta de una persona. El extremo de una barra de vidrio se calentó para darle la forma de una espátula y así poder pegar la lengua y no dificultar la iluminación y observación de la garganta. En el otro extremo del conducto de luz se acopló una pequeña lamparita

——→

FIG. 80. Transformador de fibras de la forma de la mancha luminosa del tipo rendija—cuadrado: *a* — vista lateral; *b* — luminiscencia de la cara en rendija cuando se ilumina la cara cuadrada


a)
b)
c)
a)
b)
75 mm

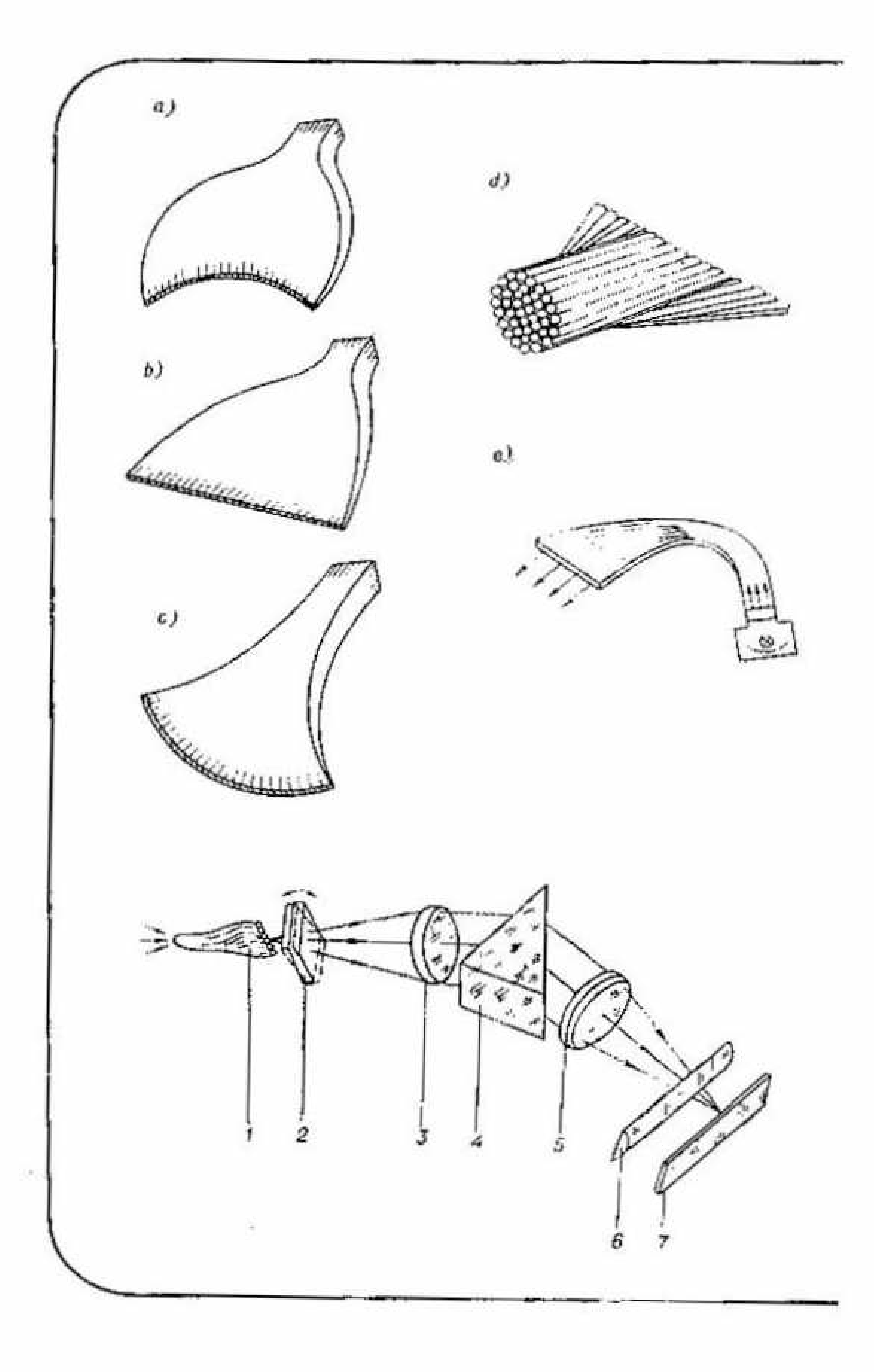

a)
b)
c)
d)
e)
1
2
3
4
5
6
7

FIG. 81. Transformadores de fibras de la mancha luminosa con un extremo lineal

←——

cuya luz por intermedio del conducto de luz iba directamente a la garganta. Los transformadores de fibras de manchas luminosas se pueden hacer de fibras monofilares (fig. 81, *e*) y multifilares (fig. 80), rectilíneas y dobladas, incluso las torcidas alrededor de su eje, rígidas y flexibles. *Transformador de fibras de la forma de una mancha luminosa en un espectrógrafo estelar.* Durante las investigaciones espectrográficas de los objetos astronómicos aparecen dificultades relacionadas con la poca luminosidad de éstos. Incluso con unas condiciones ventajosas de la atmósfera y una alta luminosidad del sistema óptico, la cantidad de luz incidente sobre la placa fotográfica no siempre es suficiente para la obtención de buenos espectrogramas. Además la hendidura de entrada del espectrógrafo recorta sólo parte de la imagen, por ejemplo, de un planeta, y por esto, hasta las exposiciones largas no dan los resultados esperados; bajo las condiciones más favorables solamente entre un 70 y un 75% de toda la luz que toma parte en la formación de la imagen en el plano de la hendidura de entrada, incide en la placa fotográfica.

Para emplear al máximo la luz, se utiliza un haz de fibras transformador de círculo en línea (fig. 81, *d*), de tal forma que sobre el extremo circular de entrada del haz de fibras *1* (fig. 82) se proyecta la imagen del objeto, que al llegar al extremo de salida coincidente con la hendidura de entrada del espectrógrafo, se transforma de

←——

FIG. 82. Vista general de un dispositivo para registrar espectros de planetas:

1—haz de fibras; *2*—placa de vidrio; *3*—objetivo colimador; *4*—prisma; *5*—objetivo de la cámara; *6*—lente cilíndrica; *7*—placa fotográfica

circular en un segmento de la recta de longitud igual a la longitud de la hendidura. La luz recibida del planeta de esta forma se emplea mucho más en su totalidad, puesto que el área total de cada uno de los extremos es igual, sobre todo cuando se trata de construcciones monofilares del transformador de fibras. Las pérdidas totales de la luz no son grandes. Las pérdidas de Fresnel debidas a la reflexión en los extremos pueden disminuir por medio de recubrimientos. Para corregir los aspectos mosaicos se emplea la placa oscilatoria de vidrio *2*, y para limitar la altura del espectro se emplea la lente cilíndrica *6*.

Tipos de conexiones de los conductos de luz. En la tercera clase de elementos de fibras además de las conexiones en paralelo y en serie características para las dos primeras clases de elementos utilizados en la fabricación de instrumentos, está difundido el tipo de conexión *mixta*. Las conexiones en paralelo de los conductos de luz de la primera y tercera clases se diferencian básicamente. Los haces de conductos de luz *1* (fig. 83, *a*) de la primera clase unidos en paralelo se encuentran claramente divididos en un extremo común *2*, mientras que los haces de conductos de luz de la tercera clase en el extremo común no están divididos: las fibras unitarias de cualquier haz *3* pueden ir a parar a cualquier punto del extremo *4* (fig. 83, *b*).

En la fig. 83, *c* se representa una conexión mixta de haces de conductos de luz de la tercera clase: la luz del exteremo *6* sale por los extremos *5*, *7*, *9*, *11* y al extremo *9* llega también de los extremos *8*, *10*, *12*. La conexión en serie de dos transformadores de fibras mixtos complica el carácter de la conexión (fig. 83, *d*). Este tipo de conexiones se emplea ampliamente en los llamados esquemas integrales ópticos, los cuales pueden transformar, transmitir y asimilar la información

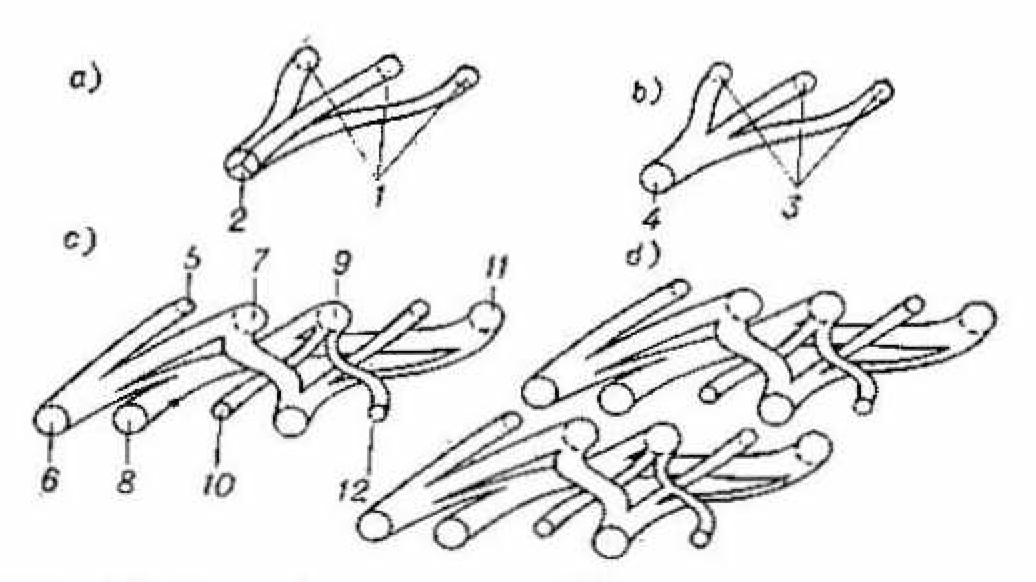


FIG. 83. Conexiones en paralelo, en serie y mixta de haces de conductos de luz de tercera clase

según la ley prefijada correspondiente al carácte-determinado de conexión de los haces de conducr tos de luz. En este caso la señal sobre la llegada y particularidad de la información para el análisis se capta a un mismo tiempo por varios receptores. De otro lado, a un mismo receptor que analiza la información por un parámetro determinado puede llegar la información luminosa por varios canales.

Dispositivo para la identificación de signos por medio de un transformador de fibras. Este dispositivo es un ejemplo de conexión mixta de haces de conductos de luz (fig. 84, *a*): la cifra por identificar *1* por medio del objetivo *2* se proyecta al extremo de entrada *3* del transformador de fibras. Este extremo de entrada consiste en una matriz con un conjunto de celdillas o de extremos cuadrados de entrada, los cuales forman transformador de haces de fibras. Estos últimos en el extremo de salida se dividen en m_k mechas elementales, donde m_k es el número de imágenes de las cifras incidentes en la k-ésima celdilla, donde $0 \leqslant m_k \leqslant 10$. De cada una de las celdillas sobre las cuales se proyecta una cifra dada, se de-

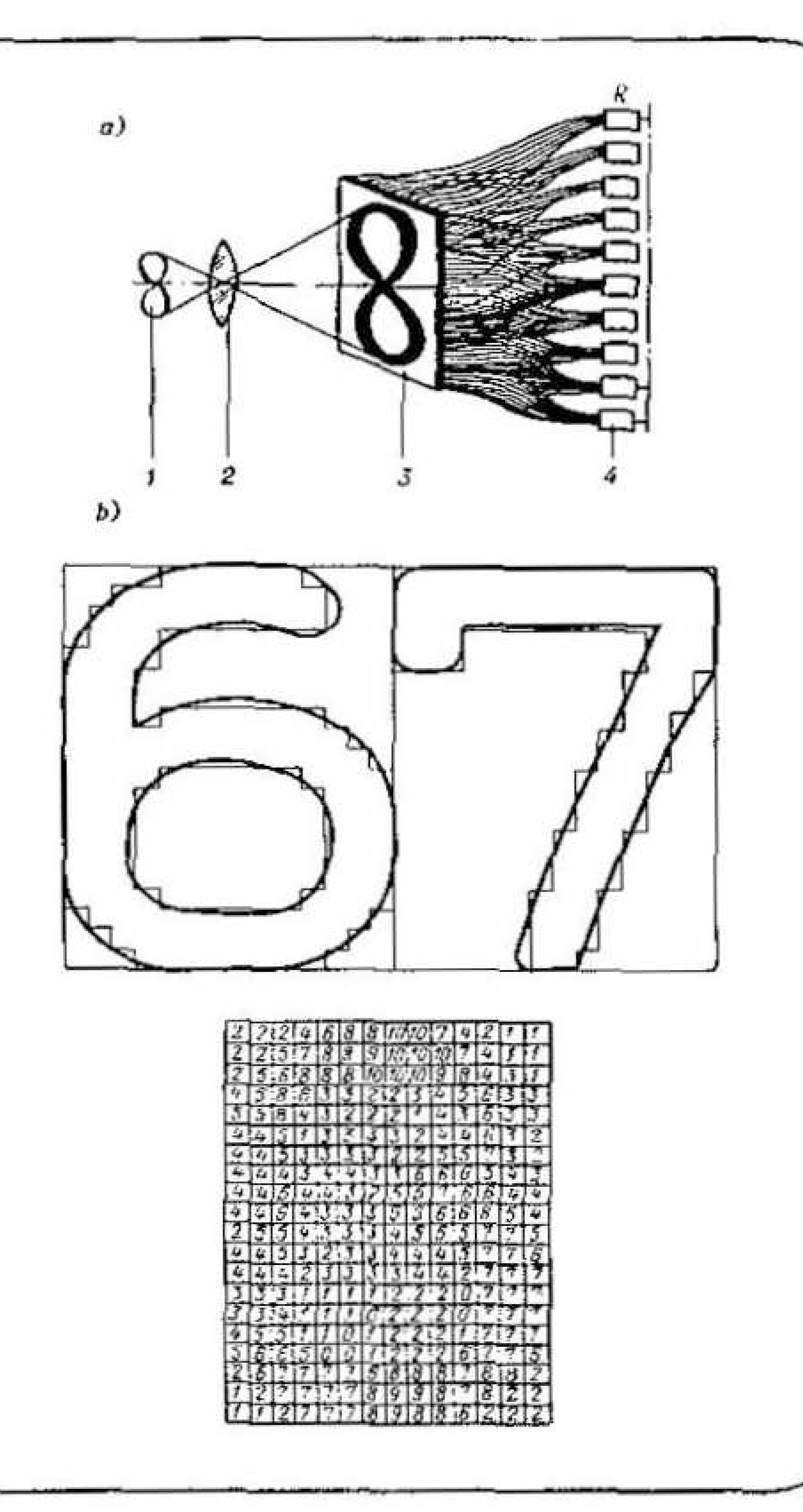
riva una mecha eletnental de fibras; estas mechas se unen en un haz y van a parar al fotorreceptor *4*, correspondiente a una cifra dada. El número de celdillas sobre las cuales se proyecta una cifra dada es transmitido por un número igual de mechas de fibras elementales a cada uno de los 10 fotorreceptores. En la fig. 84, *b* se representan algunos ejemplos de proyección de cifras al extremo de entrada del transformador; los números puestos en cada celdilla del extremo de entrada indican en cuántas mechas elementales se divide a la salida el haz de fibras de una celdilla dada. Los dispositivos de este tipo permiten identificar no sólo cifras, sino cualquier otro símbolo de contorno conocido (modelo, por ejemplo).

Más adelante cuando se examinarán los tipos concretos de transformación y de dispositivos, se citarán ejemplos de los 3 tipos de conexiones de conductos de luz.

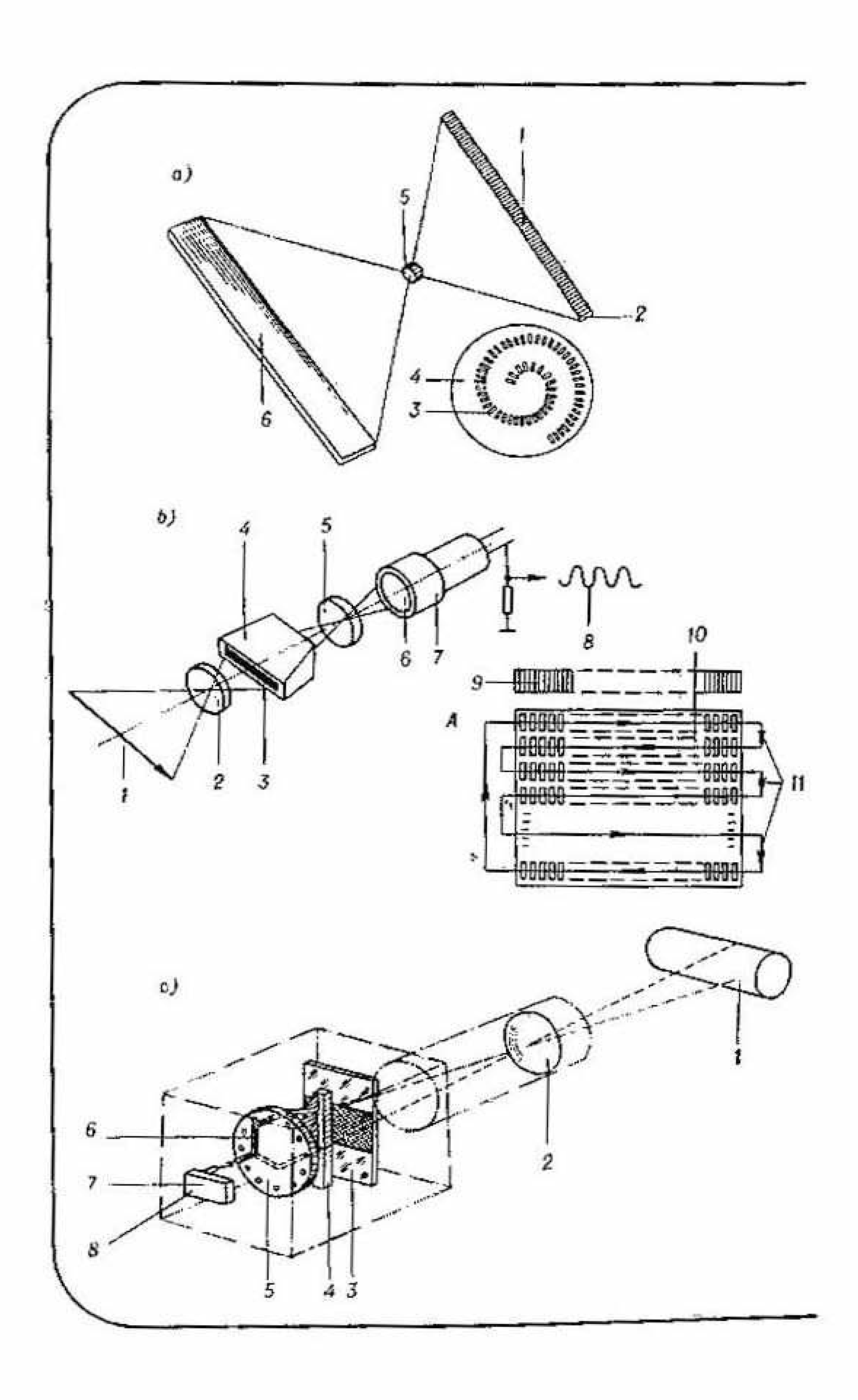
Transformadores unilineales de fibras. En los sistemas de control de los parámetros geométricos de los objetos se emplean ampliamente los transformadores de fibras unilineales en los cuales las fibras forman en el extremo de entrada una pupila luminosa estrecha lineal y en el de salida las fibras están dispuestas según el principio de exploración del tubo de televisión o del sistema de barrido. En la fig. 85, *a* se representa un transformador de fibras. A la entrada las fibras *1* de la sección rectangular de disposición compacta en línea *2*, los extremos de salida *3* de fibras están dispuestos en arandela *4* a iguales intervalos a lo largo de una línea en espiral. La arandela *4* es la ventana de entrada de un tubo transmisor de televisión. La imagen del objeto medido *6* se proyecta por medio del objetivo *5* al extremo de

⟶

FIG. 84. Dispositivo para la identificación de signos por medio de un transformador de fibras



18—01650



a)
1
2
3
4
5
6
b)
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
A
c)
1
2
3
4
5
6
7
8

entrada de la regla de fibras *2*. Durante el barrido de interrogación por medio de un haz electrónico a lo largo de la línea de exploración en espiral del tubo se generan impulsos aislados cuyo número en un período de interrogación es igual al número de fibras iluminadas, es decir, corresponde a las dimensiones del objeto en medición.

Si en un tubo de TV el barrido por medio de un haz electrónico se lleva a cabo no en espiral sino por líneas mediante el barrido alternativo, entonces en el extremo de salida las fibras se disponen en una trama rectagular multilineal (fig. 85, *b*) con igual distancia entre aquéllas en las líneas. La imagen del objeto *1* por medio del objetivo *2* se proyecta al extremo de entrada unilineal *3* del transformador de fibras *4*. La información transformada se proyecta desde el extremo de salida por medio del objetivo *5* a la ventana de entrada *6* del tubo de TV transmisor *7* y aparece en forma de una señal eléctrica numérica *8*. En la fig. 85 están representados los extremos de entrada *9* y de salida *10* del transformador y la trayectoria *11* de barrido del haz electrónico. En este transformador de fibras, la imagen lineal unidimensional del objeto a la salida se transforma en bidimensional. El sistema descrito ha permitido resolver exitosamente el problema de determinación instantánea y muy exacta de las dimensiones del laminado caliente que se desplaza por una mesa de rodillos a la velocidad de un tren expreso. Desde 1966 trabaja un transductor semejante en el tren de laminación continua de la fábrica metalúrgica de Cherepoviéts.

←——

FIG. 85. Transformadores de fibras: *a* — transformación de una línea en espiral; *b* — transformación de la línea en una imagen multilineal; *c* — dispositivo opticomecánico para la medición de dimensiones exteriores de objetos con el transformador de fibras del tipo línea—anillo y con un conducto de luz de interrogación

En los dos sistemas anteriores se ha empleado el barrido por medio de un haz electrónico. En la fig. 85, *c* se representa el esquema de un instrumento para la medición de dimensiones geométricas tanto longitud como sección del objeto *1* cuya imagen por medio del objetivo *2* se proyecta al extremo de entrada monolineal *3* del transformador de fibras *4*. Los extremos de salida de las fibras unitarias están dispuestos en agujeros que atraviesan un disco inmóvil *5* a intervalos iguales. El barrido de interrogación se lleva a cabo por medio del conducto de luz rígido curvo giratorio *6* cuya señal a través del fotorreceptor *7* llega al aparato *8* el cual denucia señales de impulsos.

Colectores irregulares de fibras. Para la resolución de muchos problemas, en la fabricación de instrumentos y en las investigaciones científicas es necesario el repartimiento de una señal luminosa de una fuente común entre varios fotorreceptores alejados o la transmisión de la radiación de varias fuentes alejadas a un solo fotorreceptor. Debido a que la fuente (o fotorreceptor) común en el transcurso del trabajo puede desplazarse con respecto a los fotorreceptores (o fuentes) distantes en el espacio, se exige flexibilidad de cada canal unitario que es portador de la señal luminosa elemental. La resolución de este problema se hace más compleja también porque en la construcción de instrumentos el área de la sección transversal del flujo luminoso de una fuente común y el área sensible del fotorreceptor son, como regla general, pequeñas.

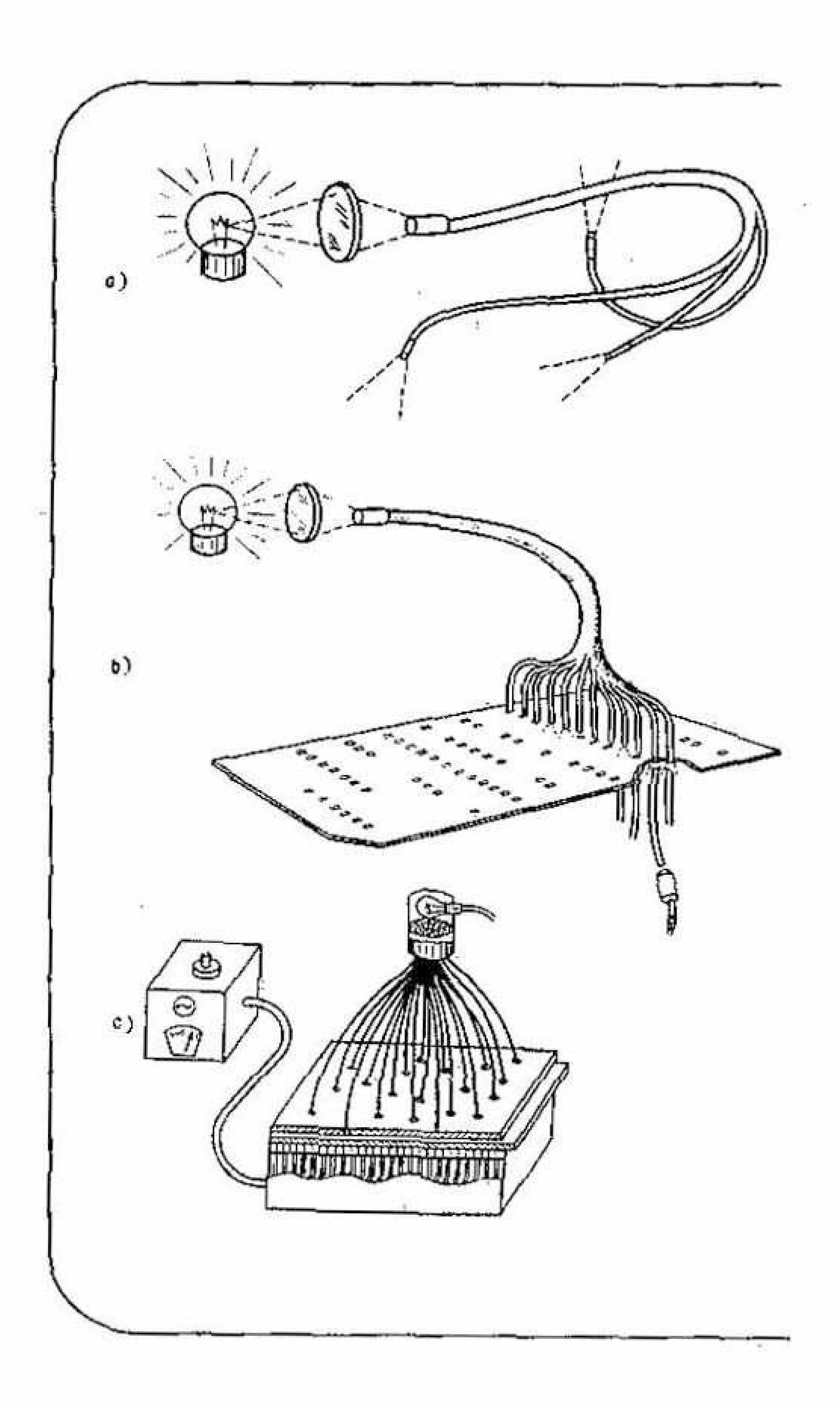
La recolección (concentración) de luz de varias fuentes y el problema inverso se resuelve simplemente por medio de colectores de fibras consistentes en haces de fibras divididos en un extremo por varias mechas elementales. Los extremos de fibras de éstas se pueden disponer en cualquier

punto del extremo común; pero si ellos ocupan espacios locales no se exige exactitud de la forma geométrica de los extremos de las mechas elementales en el extremo común. Este tipo de colectores de fibras se denominan *irregulares.*

En la fig. 58 se representa la utilización del colector de este tipo *5* para la concentración de luces (de la radiación) de varias lámparas *4* en un receptor. De acuerdo con la magnitud del flujo luminoso emergente se determina el nivel de agua en la vasija. En la fig. 86, *a* se representa el principio de «multiplicación» de la fuente de luz. En la fig. 86, *b* y *c* se muestra el empleo de colectores de fibras irregulares para la observación y análisis de tarjetas perforadas de las computadoras.

Colectores de fibras regulares. En la fabricación de instrumentos ópticos y electronoópticos hay una serie de exigencias para los colectores de señales luminosas: la utilización al máximo posible del flujo luminoso de una fuente de radiación común, la semejanza de cada mecha elemental por su transisión de luz, tolerancias rígidas en las irregularidades de transmisión de luz de mechas elementales por aparte, interacción luminosa mínima de canales individuales para la obtención de una alta relación señal/ruido.

Al emplear los colectores de señales luminosas en los sistemas de identificación de la imagen se exige determinada regularidad en la distribución de los extremos de entrada de las mechas elementales en el área luminosa (de trabajo) común de salida del colector. Casos particulares de esta ordenación son: la forma cuadrada del extremo elemental, la igualdad de áreas de los extremos de salida de todos los canales unitarios y las distancias constantes entre los centros de extremos de canales contiguos en todo el campo de trabajo de entrada del colector. Esta serie de


a)
b)
c)

exigencias son satisfechas por medio de colectores de fibras flexibles *regulares*.

El elemento básico de los colectores de fibras regulares es el haz flexible de un conjunto de fibras dispuestas irregularmente (fig. 87, *a*, *b*). Con esto se garantiza la flexibilidad de cada canal del colector. El cumplimiento de las exigencias antes dichas se hace más difícil mientras menor sea el área del extremo de la mecha elemental. Un aumento del número de mechas elementales en el colector de fibras conlleva, generalmente, a la necesidad de aumentar la longitud de canales individuales debido a una distribución no compacta de los fotorreceptores (o de fuentes unitarias de radiación). En la fig. 87, *c* se representa la distribución de extremos de las mechas elementales a la entrada común del colector durante la iluminación de los extremos opuestos de parte de canales elementales. Si aparece la necesidad, por ejemplo, en los sistemas luminitécnicos, las mechas contiguas pueden ser unidas, en el extremo libre, en un extremo común.

Los colectores regulares de fibras se emplean ampliamente en la construcción de instrumentos. De la serie de métodos de su utilización se pueden distinguir dos principios. En el primer caso, la imagen del objeto se proyecta al extremo común del colector, gracias a los elementos múltiples de este último la imagen se divide en elementos cada uno de los cuales por medio de correspondiente mecha se transmite a su propio fotorreceptor. La señal de todos los fotorreceptores se concentra en un analizador común de información. Por este principio se realiza la búsqueda *unietápica* de un objeto luminoso puntual, para lo cual los extremos de salida de todas las mechas se disponen en línea y, empleando el método de observación

←

FIG. 86. Colectores irregulares de fibras

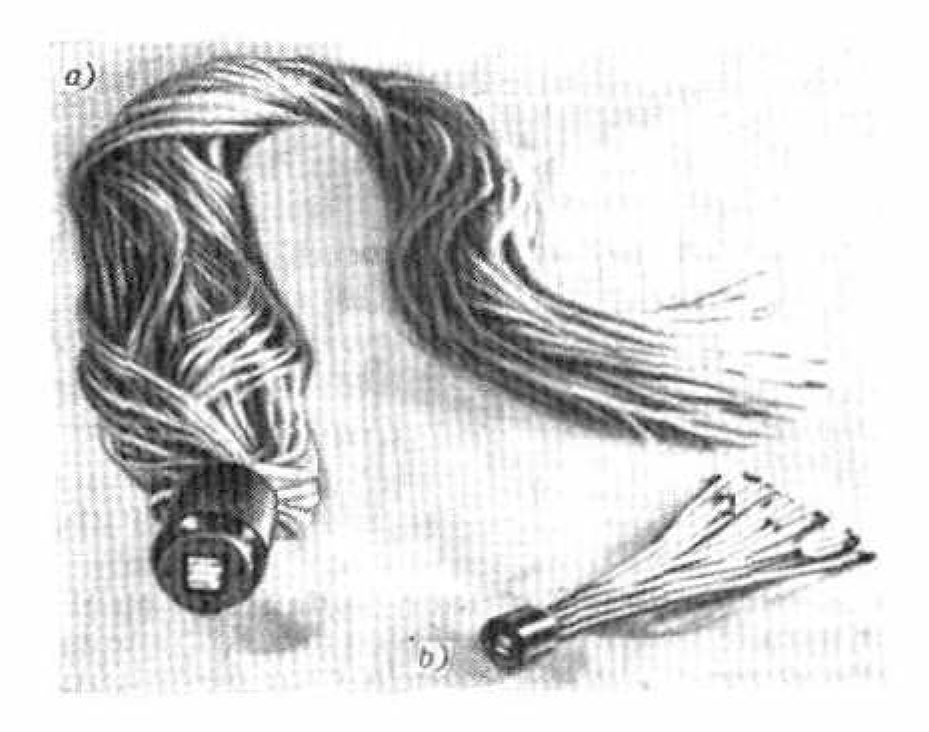
unietápica en serie de todos los extremos en esta línea, se encuentra una mecha elemental en cuyo extremo de entrada ha sido proyectada la imagen del objeto puntual. Las coordenadas del objeto puntual se determinan por la escala de la línea indicadora de coordenadas a la salida de la mecha dada.

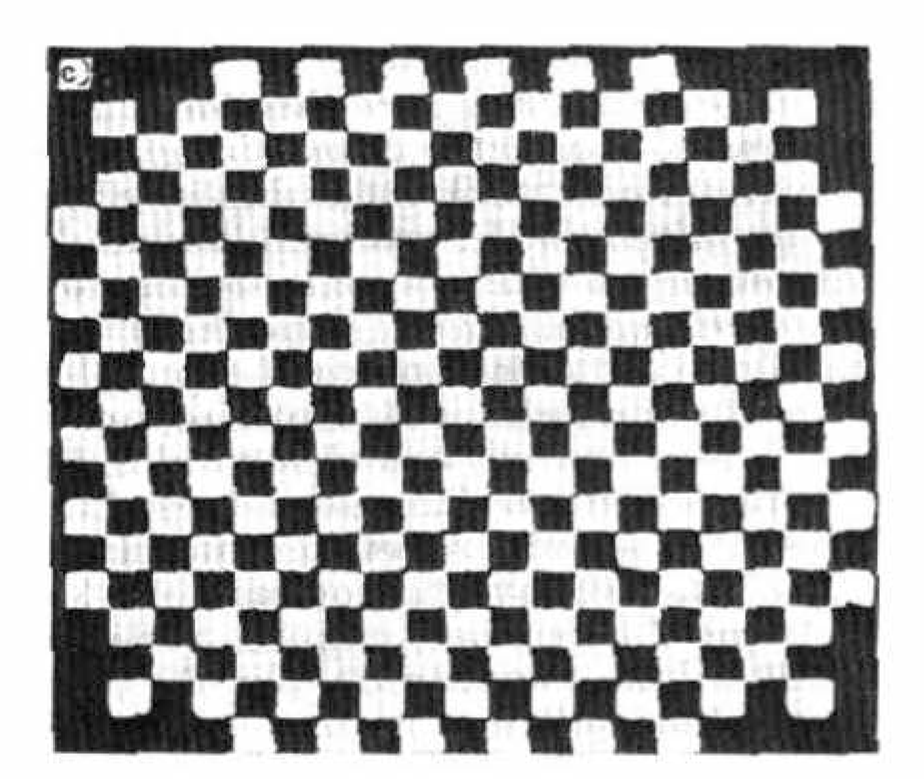
De acuerdo con otro principio de utilización de colectores regulares, los extremos libres de las mechas elementales se disponen en una matriz bajo determinada ley, por ejemplo en línea, espiral, etc. La información que llega a la matriz y que se transforma en imagen multilineal, se suministra al extremo común, donde es analizada, por ejemplo, empleando el método de barrido alternativo por líneas.

Transformadores de fibras regulares con ramificación múltiple en serie. En los colectores de fibras regulares se efectúa la conexión en serie de mechas elementales en un extremo común y la ramificación unitaria de éste. En la construcción de instrumentos se emplean ampliamente los colectores de fibras en los cuales cada mecha elemental se ramifica en mechas más finas (bifurcación doble en serie), estas últimas se subdividen en otras aún más finas y así sucesivamente; este tipo de colectores dan lugar a una división múltiple en serie de la información recibida en el extremo común de entrada del colector. Los colectores de ramificación en serie múltiple se dividen en *dos tipos*: el número de divisiones de mechas elementales en más finas es igual para todas las mechas del colector y el grado de ramificación de aquéllas obedece determinada ley. Examinemos

——→

FIG. 87. Colectores de fibras regulares: aspecto exterior del colector de 400 (*a*) y de 16 (*b*) canales elementales, *c* — fotografía del sector de la cara de entrada del colector con la iluminación de las caras opuestas de una parte de los canales elementales


a)
b)


c)

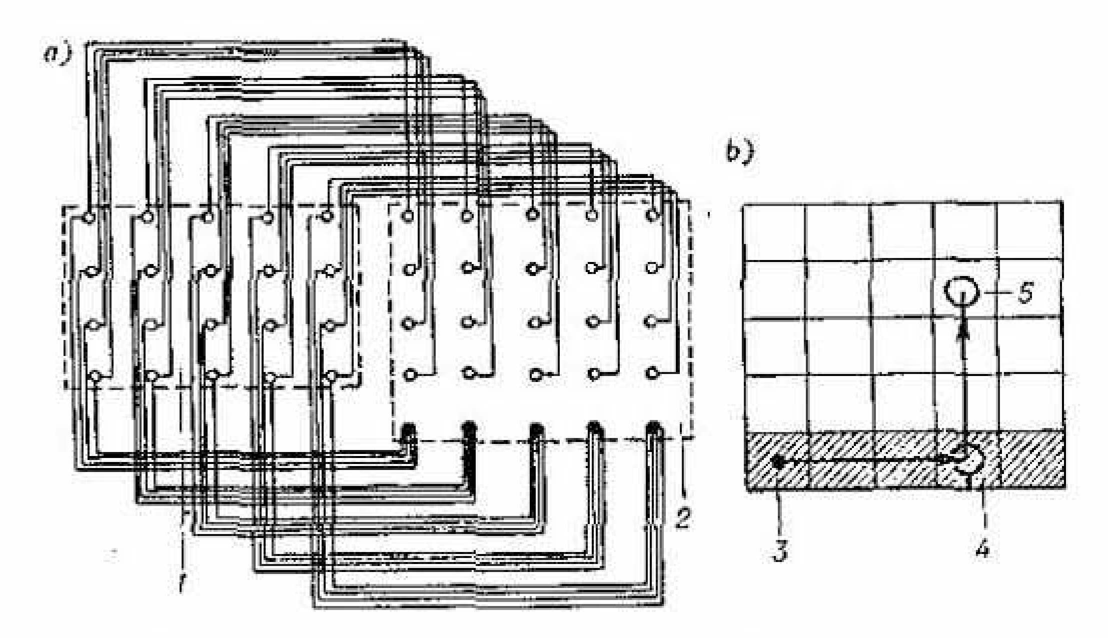


FIG. 88. Esquema de la distribución de fibras en el transformador para la búsqueda bietápica de un objeto puntual y el trayecto de exploración de la cara de salida

los dos tipos de colectores de fibras en el ejemplo de dispositivos concretos.

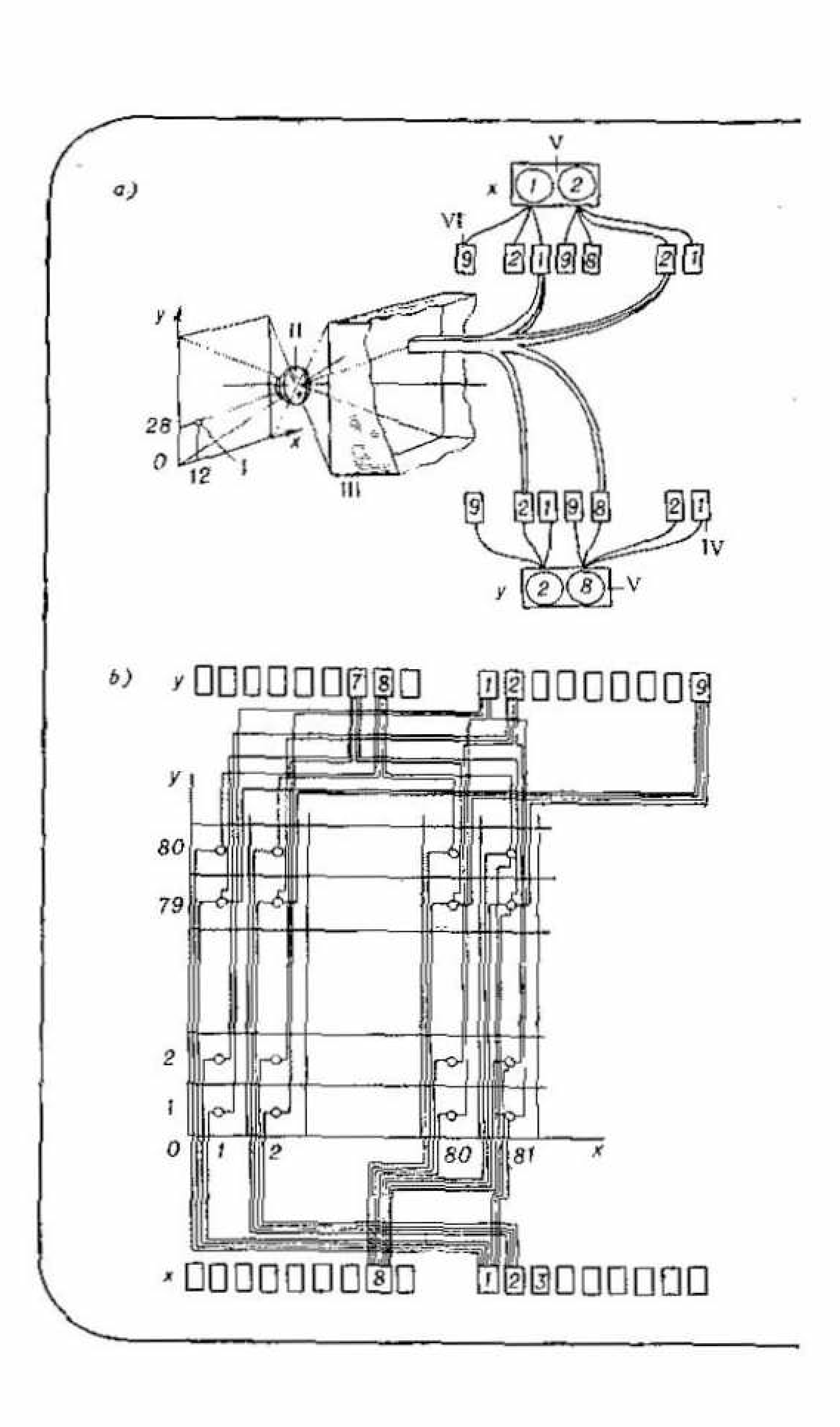
Dispositivo de fibras para barrido bietápico. Los colectores de conductos de luz de igual número de ramificaciones para todas las mechas elementales permiten la transformación de la información de igual manera para todos los elementos de la imagen. En el dispositivo de búsqueda bietápico del objeto puntual se emplea un colector de fibras regular, análogo al representado en la fig. 87 pero con mechas elementales divididas en dos ramas en los extremos libres. La imagen del espacio donde se encuentra el objeto puntual buscado se proyecta por medio del objetivo al extremo *1* de entrada (fig. 88, *a*) del transformador de fibras constituido por *N* celdillas elementales. Este último realiza una división de la imagen espacial en *N* elementos, cada uno de los cuales se transmite a la salida en forma de dos señales, correspondientes a dos ramas de las mechas elementales. Se cumple además que unas

ramales se colocan en el extremo de salida *2* al igual que en el de entrada y los segundos ramales de los elementos de una columna se reúnen en un haz y se disponen en una línea aparte. De esta forma, en el extremo de salida el número de columnas queda igual que en el extremo de entrada y el número de líneas resulta en una más.

En la primera etapa de búsqueda se realiza la observación sucesiva del campo de la línea inferior del extremo de salida (fig. 88, *b*), empezando por la región *3* del transformador de fibras, mientras no se detecte la región *4* con el objeto. En la segunda etapa se observa sucesivamente la columna vertical correspondiente a la región *4*. La búsqueda termina al detectarse el extremo de salida *5* en el cual está dispuesto el objeto. Este dispositivo permite realizar una búsqueda más rápida del objeto puntual luminoso que por la observación unietápica anteriormente descrita de todos los extremos de salida, ya que en la búsqueda bietápica se observa solamente una línea y una columna.

Determinación instantánea de la posición de un objeto puntual luminoso. Los transformadores de fibras de información permiten realizar el captador de posición del objeto puntual luminoso que determina instantáneamente dos coordenadas del objeto en el espacio debido a la eliminación de la necesidad de realizar el barrido uni y bietápico de interrogación del extremo de salida. Esto se logra diseñando más compleja la construcción del elemento de fibras, en particular, por medio de la utilización de un colector de fibras análogo al representado en la fig. 87 pero, en primer lugar, con ramificación a la salida de los haces de fibras elementales y, en segundo, con un grado de ramificación desigual para diversos haces.

Este dispositivo funciona de la siguiente forma: el objeto buscado I_k(fig. 89, *a*), por medio del



a)
V
x
1
2
VI
9
2
1
9
8
2
1
y
II
28
x
0
12
I
III
9
2
1
9
8
2
1
IV
y
2
8
V
b)
y
7
8
1
2
9
y
80
79
2
1
0
1
2
80
81
x
x
8
1
2
3

objetivo *II* se proyecta al extremo de entrada del transformador de fibras *III* en el cual los haces elementales de fibras están dispuestos en forma de matriz rectangular (fig. 89, *b*). Cada haz a la salida se divide en $m+k$ ramificaciones, donde m es el número de cifras por la coordenada x y k por la coordenada y.

En la fig. 89, *b* se representa el esquema de distribución de los haces de fibras elementales de salida. Cada rama de fibras va a su correspondiente fotorreceptor *IV*. Por ejemplo, desde el haz correspondiente al punto con coordenadas $x = 12$ e $y = 28$ las ramas de fibras van a un receptor que indica el número de decenas por el eje x (en este caso 1), y al receptor correspondiente al número de unidades por el eje x (en este caso 2); análogamente, de este mismo haz salen los ramales correspondientes a los receptores de la coordenada y. Las señales de los fotorreceptores se transmiten a los dispositivos numéricos indicadores *V*. Si sobre los ejes x, y hay hasta 999 puntos de coordenadas, entonces el número máximo de ramificaciones del haz unitario de fibras en este transformador de fibras es igual a 9 ($m = 3$, $k = 3$). A las coordenadas $x = 3$, $y = 13$ corresponde un haz de fibras con tres ramificaciones ($m = 1$, $k = 2$), y a las coordenadas $x = 53$, $y = 567$ con cinco ramificaciones ($m = 2$, $k = 3$). En el captador examinado el transformador de información de fibras de construcción compleja permite en forma bastante simple y original resolver el problema de determinación instantánea de dos coordenadas de un objeto luminoso puntual. El empleo de dos captadores de este tipo en

<——

FIG. 89. Esquema de un captador de dos coordenadas de un objeto puntual con un transformador de fibras y con distribución de fibras

conjunto y a un mismo tiempo dispuestos a determinada distancia (denominada de base), permite determinar una tercera coordenada del objeto.

13. CUARTA CLASE: ELEMENTOS FIBROSOS PARA LA TRANSFORMACION DE LA IMAGEN OPTICA

Uno de los primeros artículos sobre fibroóptica referido a la etapa moderna de su desarrollo fue dedicado a la facultad del haz de conductos de luz de transformar la imagen óptica. Este fue el artículo de Van Hul (Holanda) sobre la codificación y descodificación de la imagen por un haz de fibras irregular. En general, cualquier elemento fibroso debido a su estructura discreta transmite la imagen del objeto y «lo forma» en el extremo de salida con una *transformación* del contraste y número de elementos, es decir, con determinado grado de semejanza de la imagen al objeto pero no con una absoluta semejanza. Con otras palabras, no hay una microsemejanza de los elementos de la imagen al original, pero hay determinado grado de macrosemejanza: los contornos, una determinada distribución de los elementos macroscópicos del objeto, el carácter de macrodistribución del contraste e iluminación superficial de la imagen. Esta clase incluye los elementos fibrosos que realizan una macrotransformación de la imagen con determinado grado de macrosemejanza a su original.

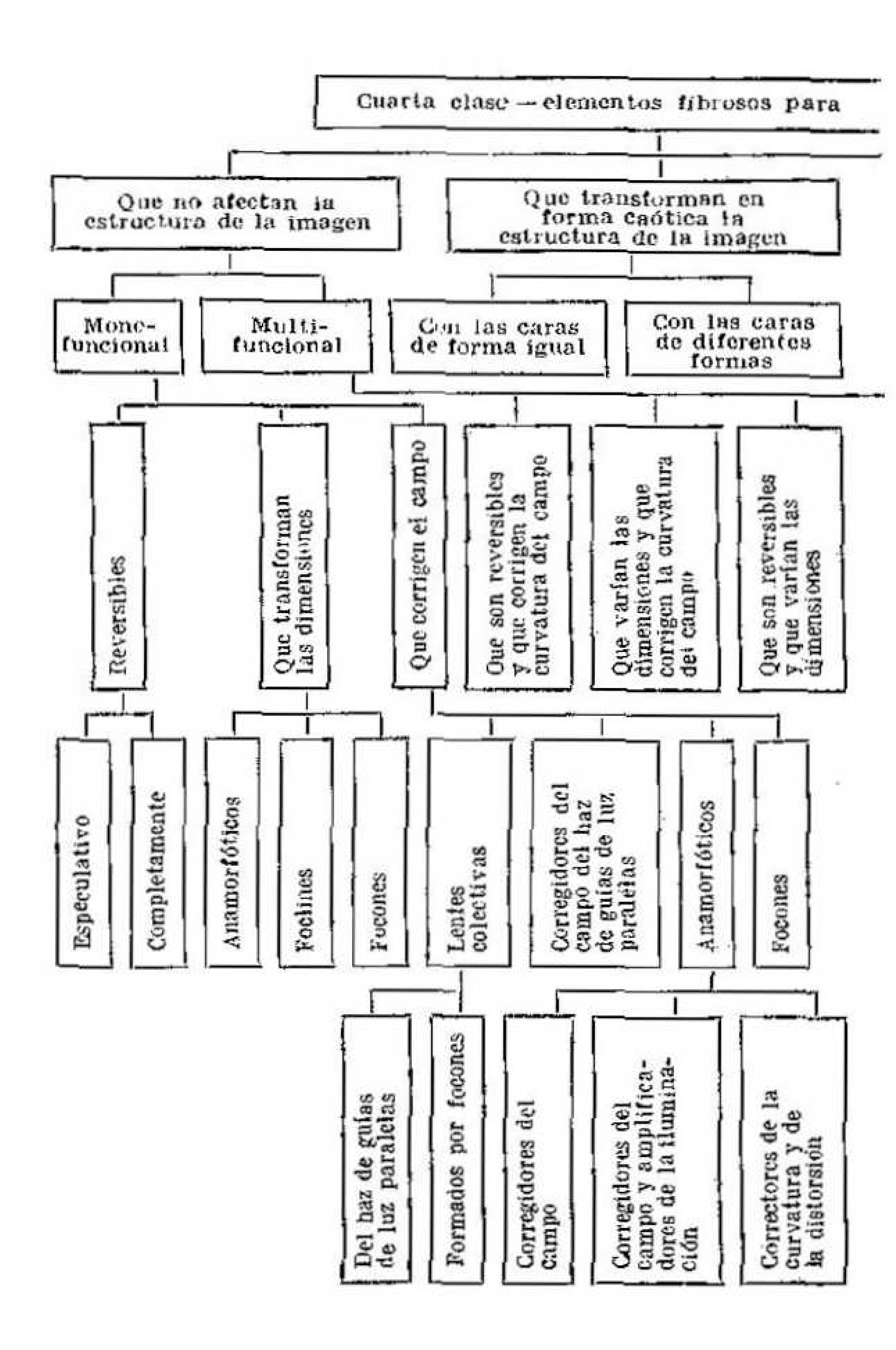
En esta cuarta clase (esquema 4) se incluyen los elementos fibrosos regulares, destinados para la transformación y transmisión de la información luminosa organizada en forma de imagen óptica: variación de la escala, anamorfismo, inversión completa y especular de las imágenes, corrección del campo de imagen y otras. Como se puede ob-

servar en la tabla 6, esta clase de sistemas de conductos de luz ocupa en la actualidad el segundo puesto por su difusión en la fabricación de instrumentos: el 14% de todo el número de clases de elementos fibrosos empleados y en diseño. Veamos los tipos fundamentales de transformación de la imagen óptica que se realizan por medio de elementos fibrosos de la cuarta clase.

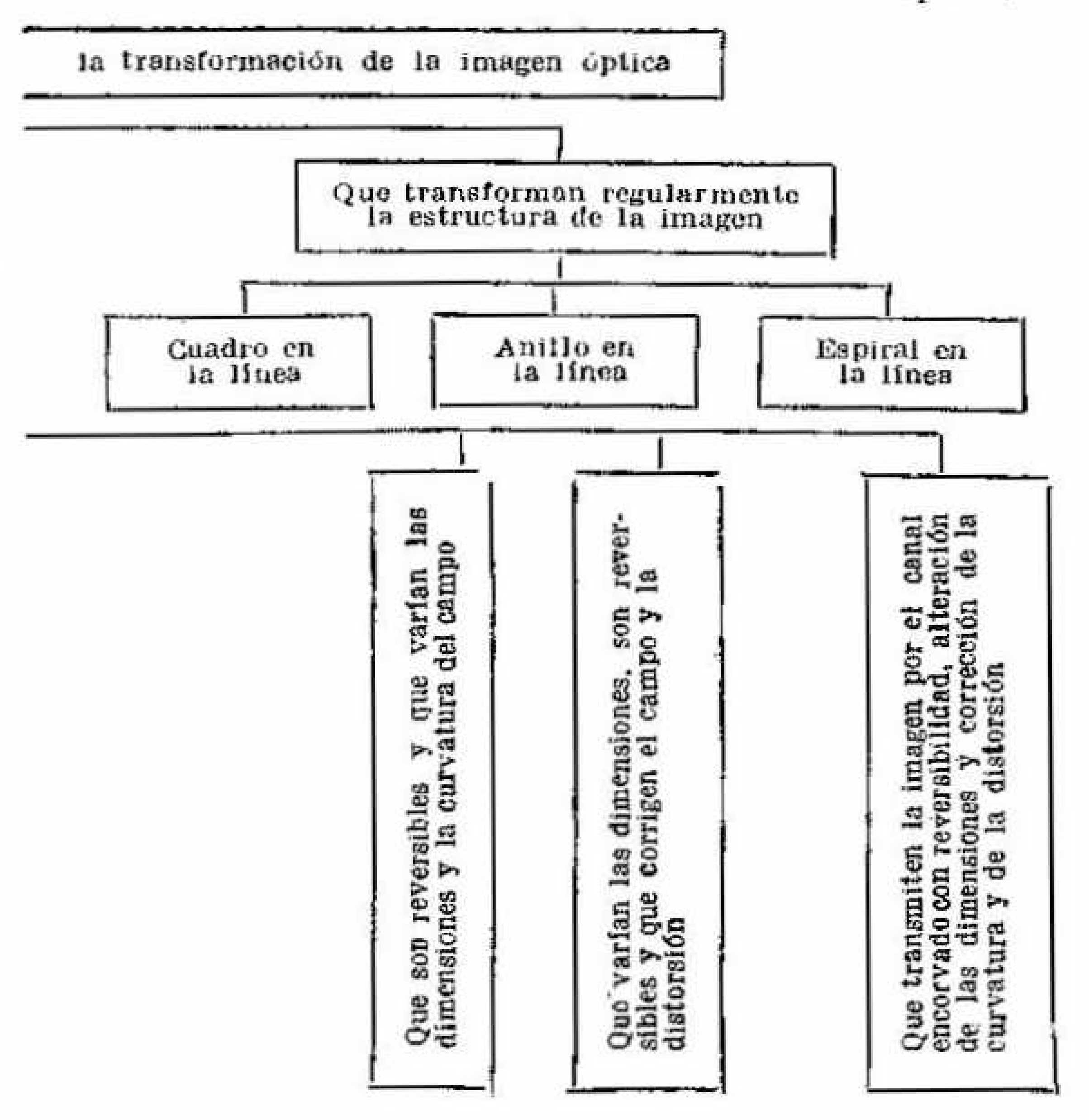
Transformación de la imagen óptica sin alteración de su estructura. Los haces de conductos de luz han permitido transmitir la imagen óptica con su transformación pero sin alterar la generalidad del cuadro, es decir, conservando su estructura organizada. No vamos a tener en cuenta objetivamente la microdiscretización de la imagen con estructura mosaica de los elementos fibrosos.

Elementos fibrosos de inversión. Los haces de fibras regulares de la segunda clase solamente transmiten la imagen desde un plano a otro que no está situado obligatoriamente en forma paralela con el primero, sin variación de la magnitud (escala) del cuadro (fig. 90, *a*, *b*, *c*). Los elementos fibrosos de la cuarta clase transmiten también la imagen de un plano (extremo de entrada) a otro (extremo de salida) conservando la magnitud del cuadro, pero transformándolo, en particular, con inversión de la imagen. En la óptica clásica son conocidos los sistemas de inversión de imagen. Estos sistemas dan una imagen simétrica especular o completamente invertida. Los elementos de fibras permiten realizar estos dos tipos de inversión de la imagen y obtener una imagen especular o completamente invertida.

En la fig. 90, *b*, *c* se representa esquemáticamente la distribución de filas y columnas de conductos de luz en los extremos de entrada y salida del haz de conductos de luz de la *segunda clase*. En los elementos fibrosos especulares de inversión



Cuarta clase — elementos fibrosos para
Que no afectan la estructura de la imagen
Que transforman en forma caótica la estructura de la imagen
Mono-funcional
Multi-funcional
Con las caras de forma igual
Con las caras de diferentes formas
Reversibles
Que transforman las dimensiones
Que corrigen el campo
Que son reversibles y que corrigen la curvatura del campo
Que varían las dimensiones y que corrigen la curvatura del campo
Que son reversibles y que varían las dimensiones
Especulativo
Completamente
Anamorfóticos
Foclines
Focones
Lentes colectivas
Corregidores del campo del haz de guías de luz paralelas
Anamorfóticos
Focones
Del haz de guías de luz paralelas
Formados por focones
Corregidores del campo
Corregidores del campo y amplificadores de la iluminación
Correctores de la curvatura y de la distorsión


la transformación de la imagen óptica
Que transforman regularmente la estructura de la imagen
Cuadro en la línea
Anillo en la línea
Espiral en la línea
Que son reversibles y que varían las dimensiones y la curvatura del campo
Que varían las dimensiones, son reversibles y que corrigen el campo y la distorsión
Que transmiten la imagen por el canal encorvado con reversibilidad, alteración de las dimensiones y corrección de la curvatura y de la distorsión

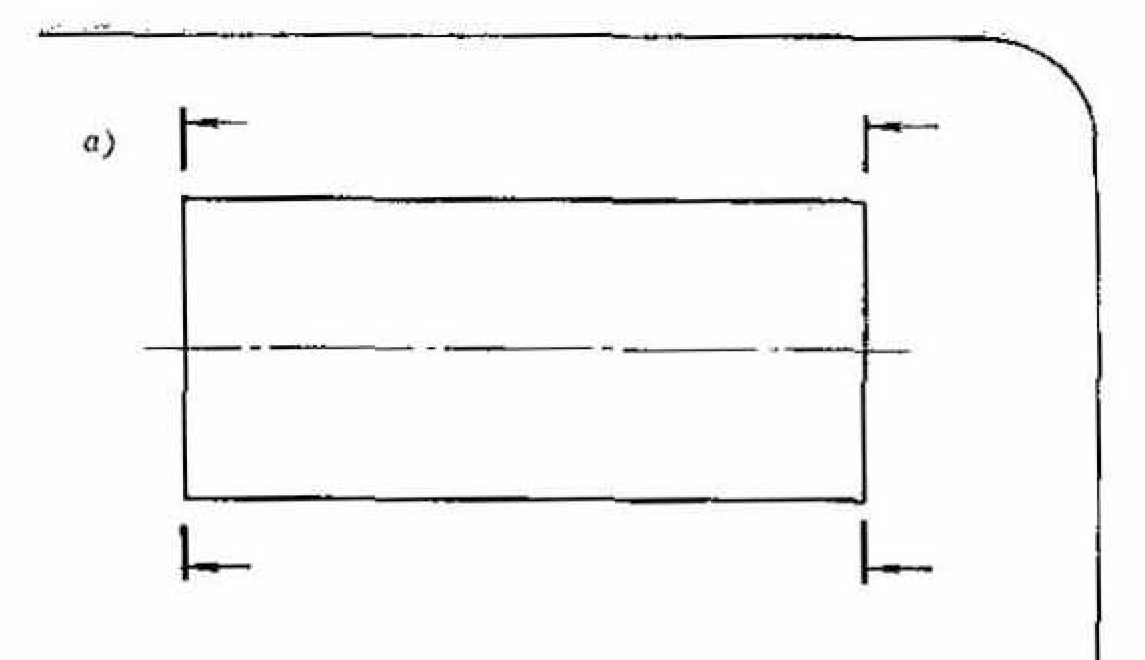
(fig. 90, *b*, *d*) el orden de disposición de las columnas en el extremo de entrada se ha conservado, mientras que las filas han cambiado especularmente de lugares; a una inversión completa, por ejemplo, de 180°, el orden de disposición tanto de las filas como de las columnas se conserva (fig. 90, *b*, *e*), pero todo el extremo de salida con respecto al de entrada, junto con él la imagen, está invertido a 180° alrededor del eje del haz (fig. 91). Las piezas de fibras de este tipo se fabrican por calentamiento de una pieza bruta termoprensada preliminarmente con conductos de luz dispuestos en paralelo y después con una torsión forzada alrededor del eje a un ángulo exigido.

Los haces inversores de conductos de luz se pueden utilizar en los sistemas ópticos y electronoópticos donde la estructura mosaica de los elementos de fibras no sean un impedimento para su empleo. En cuanto a la transmisión de luz ceden ante los sistemas clásicos. Sin embargo, las perspectivas de su empleo en la fabricación de instrumentos de los haces de conductos de luz de inversión, están determinadas por la gran abertura de los conductos de luz, la cual supera el valor medio de los sistemas ópticos comunes, el paralelismo plano de ambos extremos de trabajo de las piezas fibrosas de inversión y además la posibilidad de realizar, junto con una inversión de la imagen y la corrección del campo de curvatura de los sistemas anterior y posterior.

Variación simétrica de las dimensiones de la imagen. Un haz de conductos de luz dispuestos regularmente y con sección variable a lo largo, transmite la imagen aumentada o disminuida.

→

FIG. 90. Transmisión de una imagen por un haz de conductos de luz



b) 1 2 3 4 5 6 n — 1° 2° — K ésimo

c) 1' 2' 3' 4' 5' 6' n' — 1° 2° — K-ésimo

d) K-ésimo — 2° 1° — 1' 2' 3' 4' 5' 6' n'

e) K-ésimo — 2° 1° — n' 6' 5' 4' 3' 2' 1'



FIG. 91. Elementos fibrosos de inversión de la imagen

En la fig. 92, *a* se representa la parte delantera de una imagen disminuida. Se cumple, además, que en el extremo pequeño de salida aumenta la luminosidad en comparación con el de entrada; la inclinación angular de los rayos salientes del extremo pequeño es mayor que la de los de entrada en el extremo grande. En el caso de una transmisión de la imagen a la inversa su dimensión aumenta y disminuye la luminosidad, al igual que el ángulo de los rayos salientes del extremo mayor. En la fig. 92, *b* aparece el esquema de principio del microscopio-aguja *3*. Al introducir una aguja de este tipo, por ejemplo, en el tejido *1* de un animal, se pueden observar las células adyacentes al extremo pequeño del focón *2*. La imagen transmitida con aumento se observa por medio del ocular *4* en el extremo de salida.

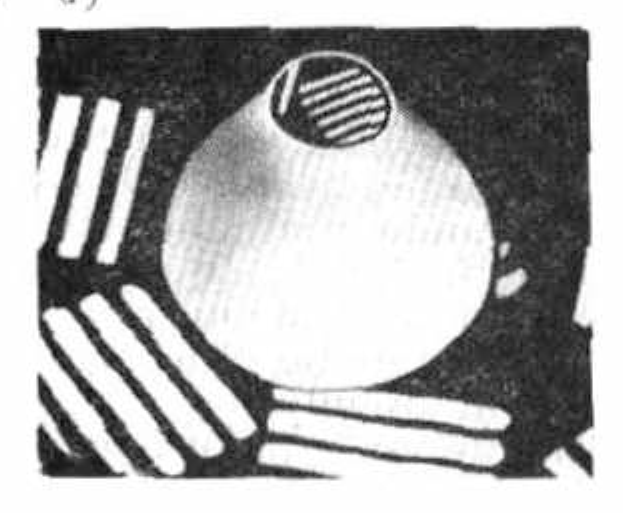
Anamorfadores fibrosos. En la fabricación de instrumentos se utiliza frecuentemente la trans-

misión de la imagen variando sus dimensiones en una dirección y conservando las dimensones perpendiculares a la primera dirección, lo que constituye el denominado anamorfismo de la imagen. En la óptica clásica este problema se soluciona con el empleo de lentes cilíndricas. Los transformadores de fibras de imagen también pueden transmitir la imagen variando sus dimensones sólo en una dirección. En la fig. 92, *c* se representa la transmisión por medio de un anamorfador de imagen con la disminución de las dimensiones de las letras en dirección del renglón. En el caso de una transmisión a la inversa esta imagen aumenta en una dirección y se conserva igual en la otra.

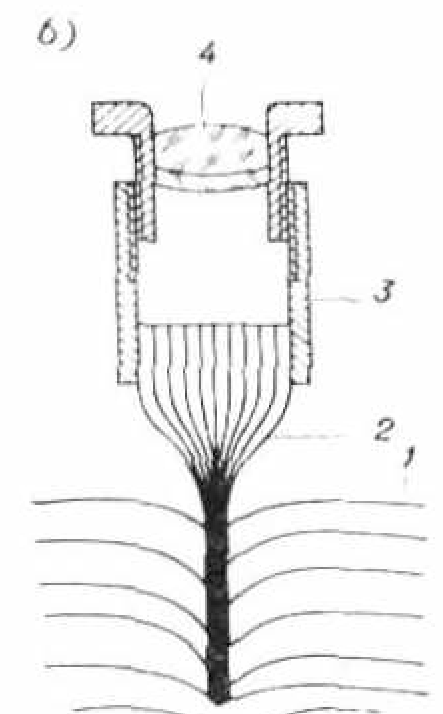
Funcionalidad múltiple de los transformadores de fibras. Algunas de sus ventajas fundamentales se verán más adelante al realizar el análisis concreto de los dispositivos. Los focones de la fig. 92, *d* transmiten la imagen sólo con la variación de las magnitudes del objeto, sin embargo, los focones indicados en la fig. 92, *e*, además de la disminución de las dimensiones de la imagen, realizan la inversión de la misma. En el laringoscopio para medicina, de producción soviética, se utiliza un focón-conducto de luz, el cual cumple a la vez varias operaciones: la transmisión de la imagen a través de un canal de compleja configuración, la inversión completa de la imagen en 180°, el aumento simétrico de las dimensiones de la imagen del objeto en cinco veces, la corrección de la curvatura del campo de la imagen de los sistemas ópticos de entrada y salida.

Transformadores de fibras de la imagen en la construcción de objetivos. Sin detenernos en el empleo que se da en las diferentes ramas de la técnica a los haces de conductos de luz que realizan la transformación de la imagen sin la alteración de la integridad, nos limitaremos sola-

a)



б)



c)



d)

ГИКО
И ЕС АЯ
ЛЕННОСТЬ

e)

ГИКО
И ЕС АЯ
ЛЕ НОСТЬ

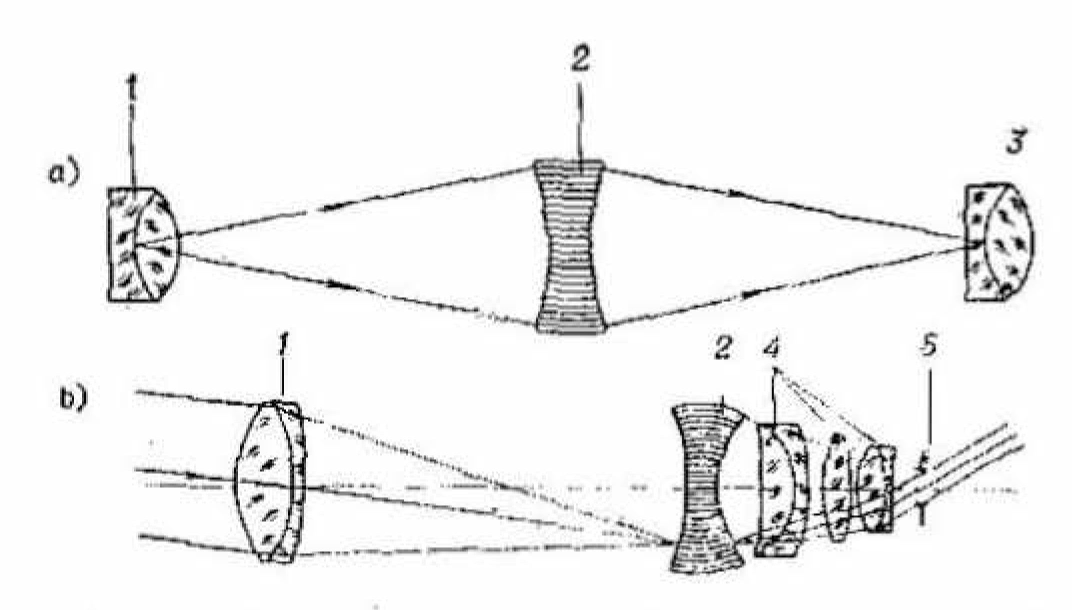


FIG. 93. Transformadores de fibras de imagen en los objetivos en calidad de lentes colectivas

mente a exponer los principios de su utilización en la construcción de objetivos. Para mejorar la calidad de la imagen a frecuencias del retículo espacial entre 60 y 80 líneas por milímetro y para el aumento del ángulo de visión y la luminosidad en los diferentes tipos de objetivos se emplean los transformadores de fibras de la imagen: para la nivelación del campo de la imagen, el aumento de la iluminación de la imagen, la corrección de la distorsión y otros más. Estos elementos de fibras se pueden emplear por partes o en conjunto en forma de conexiones en serie.

Lentes colectivas de fibras. El haz de conductos de luz *2* con una superficie microescalonada en ambas caras en forma de lentes de Fresnel (fig. 93, *a*) en el sistema de objetivo *1* — haz de conductos de luz *2* — ocular *3*, corrige la curva-

⟵

FIG. 92. Transformadores de fibras de imagen: *a* — disminución asimétrica de la imagen por el eje; *b* — esquema de aguja — microscopio; *c* — variación de las dimensiones en una dirección; *d* — transmisión de la imagen por jocones con disminución; *e* — con inversión

tura del campo de la imagen del objetivo y del ocular y además realiza las funciones de colector. Este tipo de lentes de fibras puede ser empleado en los sistemas angulares amplios, permitiendo a la salida del sistema un poder resolutivo del campo y la característica de contraste-frecuencia más uniformes en el campo, simplificando al mismo tiempo la construcción del objetivo y del ocular. Sin embargo, la dificultad tecnológica de construcción de las lentes de fibras con superficies microescalonadas de las caras y la dificultad de su explotación limitan las posibilidades del empleo de estas lentes de fibras colectivas en la fabricación de dispositivos ópticos.

La lente de fibras colectiva *2*, en forma de un focón bicóncavo (fig. 93, *b*), al ser utilizada en los sistemas ópticos (por ejemplo, microscopios, instrumentos telescópicos y otros) concentra los rayos entrantes al objetivo *1* y los dirige a la pupila de salida *5* del ocular *4*; durante este proceso a la vez se corrigen la curvatura y distorsión de la imagen del objetivo y del ocular. En este tipo de lentes de fibras, el rayo que pasa a través del centro del objetivo o del ocular, después de la refracción en las caras del hilo conductor de luz dado se dirige a lo largo de su eje. En el sistema óptico representado en la fig. 93, *b* el poder resolutivo y el coeficiente de transmisión de contraste son lo suficientemente uniformes en el campo; sin embargo, el poder resolutivo total de todo el sistema está limitado por el poder resolutivo del haz de conductos de luz.

Nivelación de la curvatura del campo de la imagen de los objetivos. Las lentes a base de conductos de luz para la corrección de la curvatura de la imagen de los objetivos de campos de visión pequeño y medio (fig. 94, *a*) consisten en un haz de conductos de luz colocados en paralelo, cuya cara de entrada tiene una superficie cón-

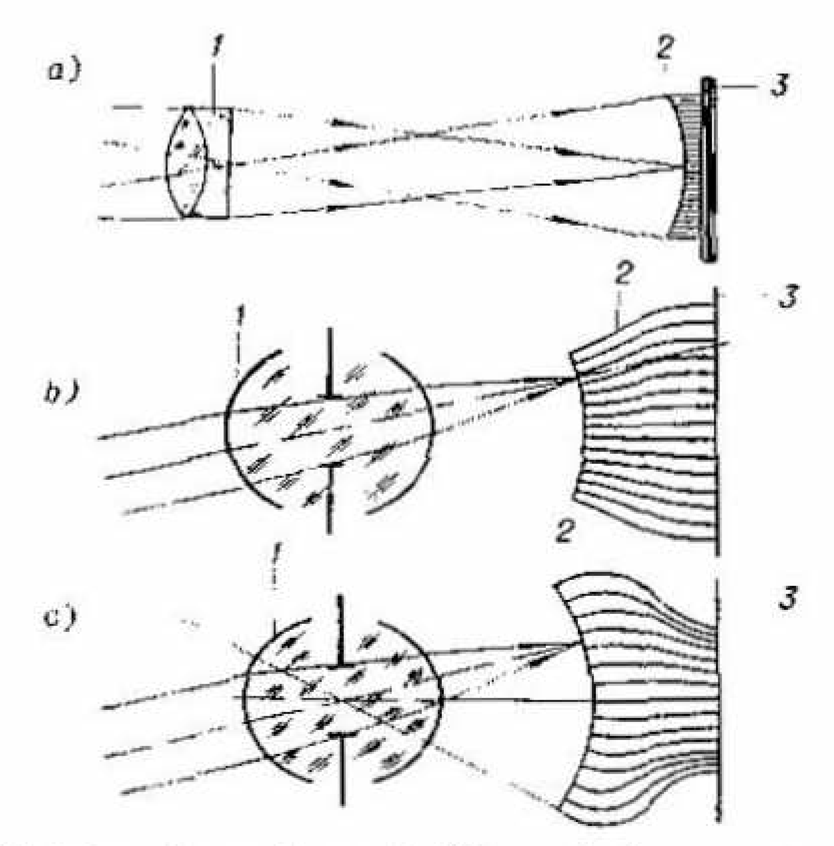
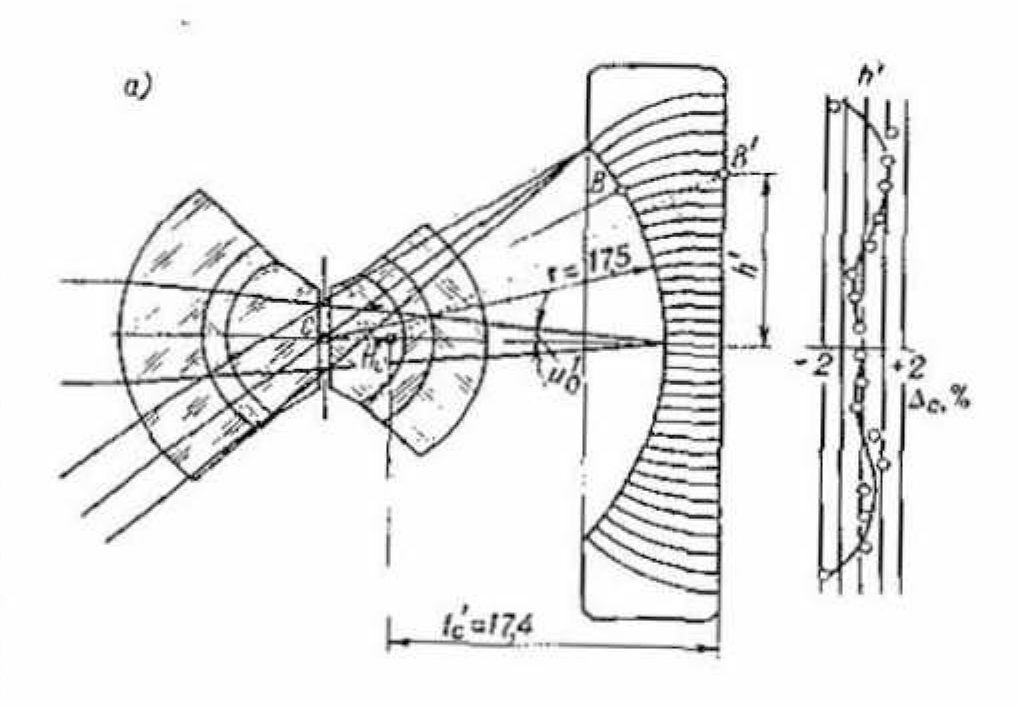


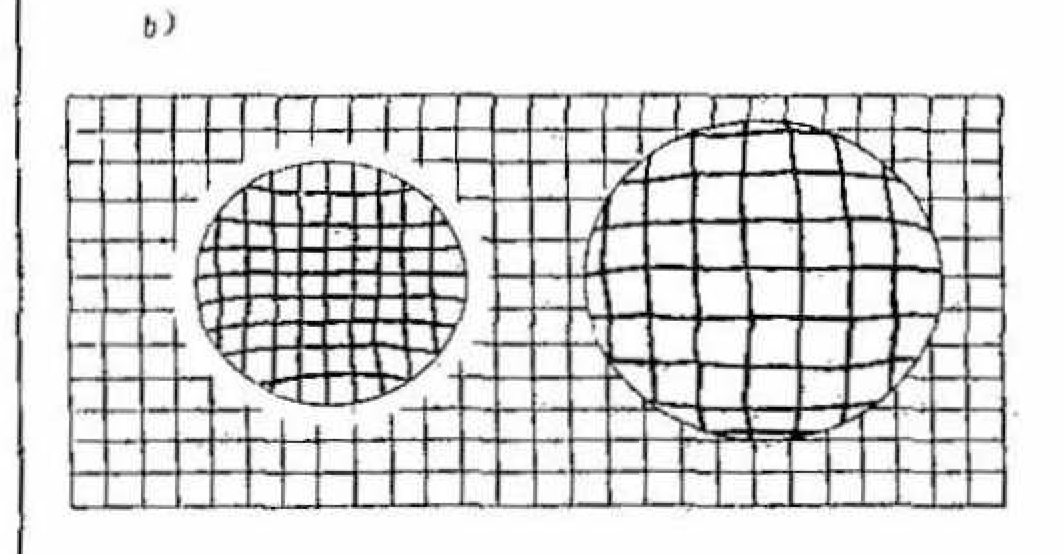
FIG. 94. Transformadores de fibras de la curvatura de la imagen en calidad de la ventana de salida de objetivos: 1—lente; 2—transformador de fibras de imagen; 3—placa fotográfica

cava que corresponde a la curvatura del campo de la imagen dada por el objetivo. A la cara plana de salida se aprieta en contacto una película fotográfica o la imagen se observa directamente por el ojo humano. Durante la utilización de objetivos con un campo curvo se emplea un haz de conductos de luz paralelos que aumenta el poder resolutivo en los extremos del campo de visión y lo disminuye en el centro. Este tipo de lentes de fibras produce la distorsión, o sea la compresión de la escala de la imagen al extremo del campo hasta los límites generalmente permitidos en los objetivos solamente con campos de visión medios. Para los objetivos gran angulares, por ejemplo, los concéntricos, las lentes de fibras hechas de conductos de luz dispuestos parale-

a)



b)



lamente no se pueden utilizar ya que no dejan pasar en los extremos del campo de visión aquellos haces de rayos luminosos que tienen ángulos grandes de inclinación. Este problema origina inevitablemente una fuerte disminución de la luminosidad no permisible en los extremos del campo de visión. Las lentes de fibras de esta clase se emplean para campos de visión comprendidos entre $2u_1 = 50—60°$.

En los objetivos gran angulares se emplean lentes de fibras tipo focones, en los cuales los hilos conductores de luz elementales llegan en forma perpendicular al extremo de entrada cóncavo y al de salida plano. En la fig. 94, *b* se representa el esquema de un objetivo esférico gran angular; la curvatura del campo de imagen y la distorsión en este objetivo se corrigen por medio de un focón de fibras. Sin embargo, en este sistema óptico que tiene un focón de ensanche, la luminosidad a la salida disminuye desde el centro al extremo en forma directamente proporcional al cubo del coseno de la distancia angular, lo que es un defecto de este sistema. En la fig. 95, *a* indica un esquema de rectificación de la curvatura y la distorsión de la imagen de un objetivo concéntrico tipo «Sferogon». La corrección de la distorsión Δ_c con tales focones se realiza a base de la distorsión propia de éstos, que tiene forma acubada o de almohadilla (fig. 95, *b*).

Las lentes de fibras focones pueden rectificar la curvatura del campo de imagen de los objetivos gran angulares de alta luminosidad dando lugar en contraposición al caso anterior, a una iluminación uniforme por el campo de imagen (en el extremo de salida del focón). Este sistema

←——

FIG. 95. Esquema de rectificación de la curvatura y la distorsión de la imagen de un objetivo concéntrico del tipo «Sferogon»

formado por el objetivo esférico y el focón estrechado se indica en la fig. 94, *b*, pero este sistema posee, en general, una distorsión muy grande a la salida en forma de almohadilla.

Como hemos visto anteriormente, la rectificación de la curvatura de la imagen de los objetivos gran angulares, por ejemplo, en los aparatos cinematográficos y cámaras, por medio de lentes de fibras, permite emplear objetivos de alta luminosidad logrando con esto corregir la distorsión (figs. 94, *b*, 95, *a*) pero alterar la distribución de la luminosidad a la salida en el plano de la imagen, o a la inversa, al introducir una alta distorsión se puede nivelar la luminosidad en el plano de salida (fig. 94, *c*). El campo de visión de los sistemas objetivo — focón puede ser grande y alcanzar un valor $2u_1 = 120 \div 150°$, pero el poder resolutivo de estos sistemas está limitado por la resolución de los elementos fibrosos.

Aumento de la luminosidad de los objetivos con pequeños campos de visión. Esto se puede lograr mediante el empleo de focones muy estrechados a la salida de los objetivos. En la fig. 96, *a* se muestra el esquema de un objetivo de lente especular *1* con el focón *2*. Un aumento bastante grande de la luminosidad en el extremo de salida pequeño del focón ha permitido obtener fotografías del relieve lunar por medio del método de contacto. Para aumentar bruscamente la luminosidad del objetivo *1*, el cual tiene un campo de visión pequeño, a la salida (fig. 96, *b*) se emplea el focón *2* que corrige a la vez la curvatura del campo de imagen del objetivo.

Este tipo de sistema permite un gran aumento de la iluminación en el extremo de salida. En los últimos dos o tres años se propone frecuentemente utilizar un objetivo «superluminoso», con lo que los autores afirman que dicho objetivo

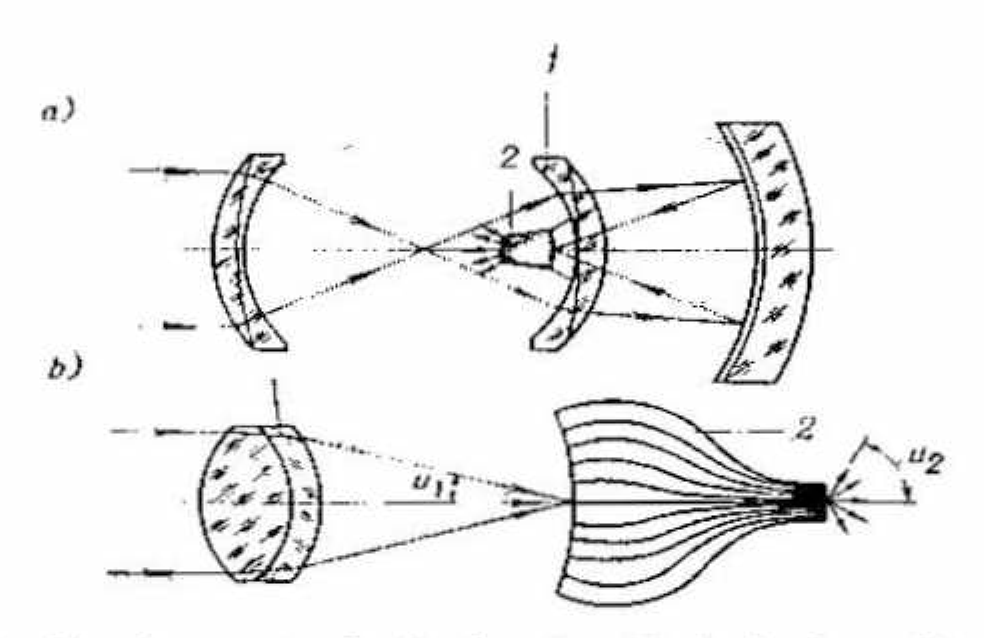


FIG. 96. Aumento de la luminosidad de los objetivos

posee un alto poder resolutivo, peso liviano, y alto coeficiente de transmisión de contraste y una uniformidad de todos los parámetros ópticos del campo, es decir, que prácticamente no tiene defectos. Examinemos el objetivo mencionado con más detenimiento.

La imagen captada por el objetivo de lente se proyecta al extremo ancho del focón y se transmite con disminución (y por lo tanto aumentando la luminosidad) al extremo pequeño. En contacto con este último se dispone una película fotográfica para registrar la imagen. El poder resolutivo del objetivo junto con el focón se determina por el poder resolutivo del extremo grande de entrada del focón. El diámetro D_2 y la magnitud $R_2 = (2D_2)^{-1}$, donde D_2 es la distancia entre los centros de los hilos adyacentes a la salida del focón, caracteriza *solamente* la densidad de información en el extremo de salida, es decir, determina el grado de compresión, de disminución de la imagen. Supongamos que el objetivo de lente a la entrada del focón tiene un poder resolutivo infinito y que su coeficiente de transmisión de con-

traste en todo el campo y para todas las frecuencias de la imagen de prueba es igual a 1. Incluso con estas suposiciones extremas el poder resolutivo del sistema objetivo de lente — focón estrechado es igual a $(2D_1)^{-1}$, donde D_1 es la distancia entre los centros de los hilos adyacentes en la cara de entrada del focón.

Sin tener en cuenta que ya para diámetros de los hilos de fibras entre 2—3 μ ocurre una difusión y difracción luminosa fuerte, y que, además, este tipo de densidad de los filamentos conductores de luz, y, por lo tanto, la cantidad de información son difíciles de lograr desde el punto de vista de los aparatos. Vamos a suponer que el diámetro de un filamento a la salida de un focón es igual a 1,5 μ y que el espesor de las capas aisladoras luminosas es de 1 μ. Veamos solamente un focón de reducción al décuplo. En este caso los filamentos a la entrada del focón tienen un diámetro de 15 μ, un espesor del aislador de 10 μ y un paso de construcción $D_1 = 15 + 10 = 25$ μ, o sea, que el poder resolutivo teórico o nominal del extremo de entrada grande del focón es igual sólo a $R_1 = (2D_1)^{-1} = 1/50 = 20$ líneas/mm. El coeficiente de relleno por filamentos de la cara de entrada del focón, o sea, la capacidad de su transmisión de luz, (sin tener en cuenta las pérdidas en las reflexiones de Fresnel y en la absorción en el vidrio) $\tau_5 = 15^2/(15 + 5)^2 = 15^2/20^2 = 56\%$. Además de esto, la abertura de entrada de cada una de las fibras elementales en la entrada del focón es de sólo 9°. De esta forma, un objetivo que tenga un focón fuertemente estrechado a la salida (fig. 96, *b*) se distingue por su bajo poder resolutivo, una transmisión de luz no muy alta y puede aumentar realmente la luminosidad de los objetivos sólo en el caso en que estos últimos tengan un pequeño campo visual.

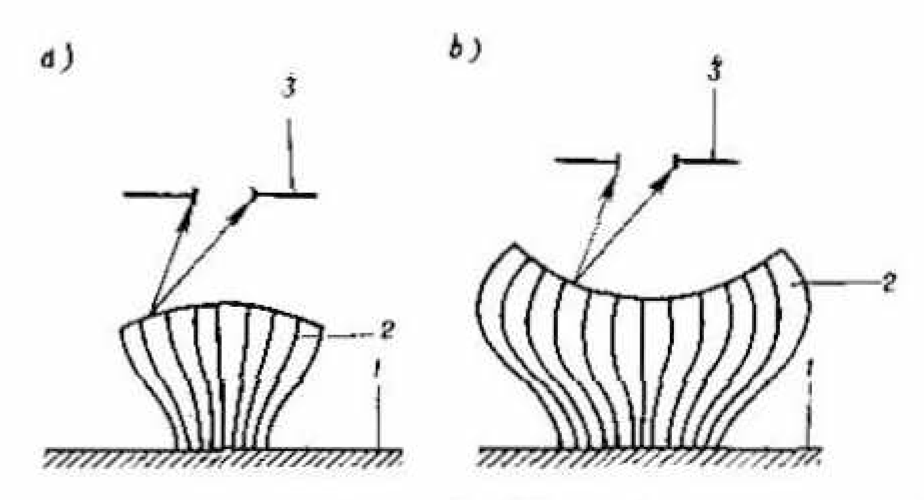
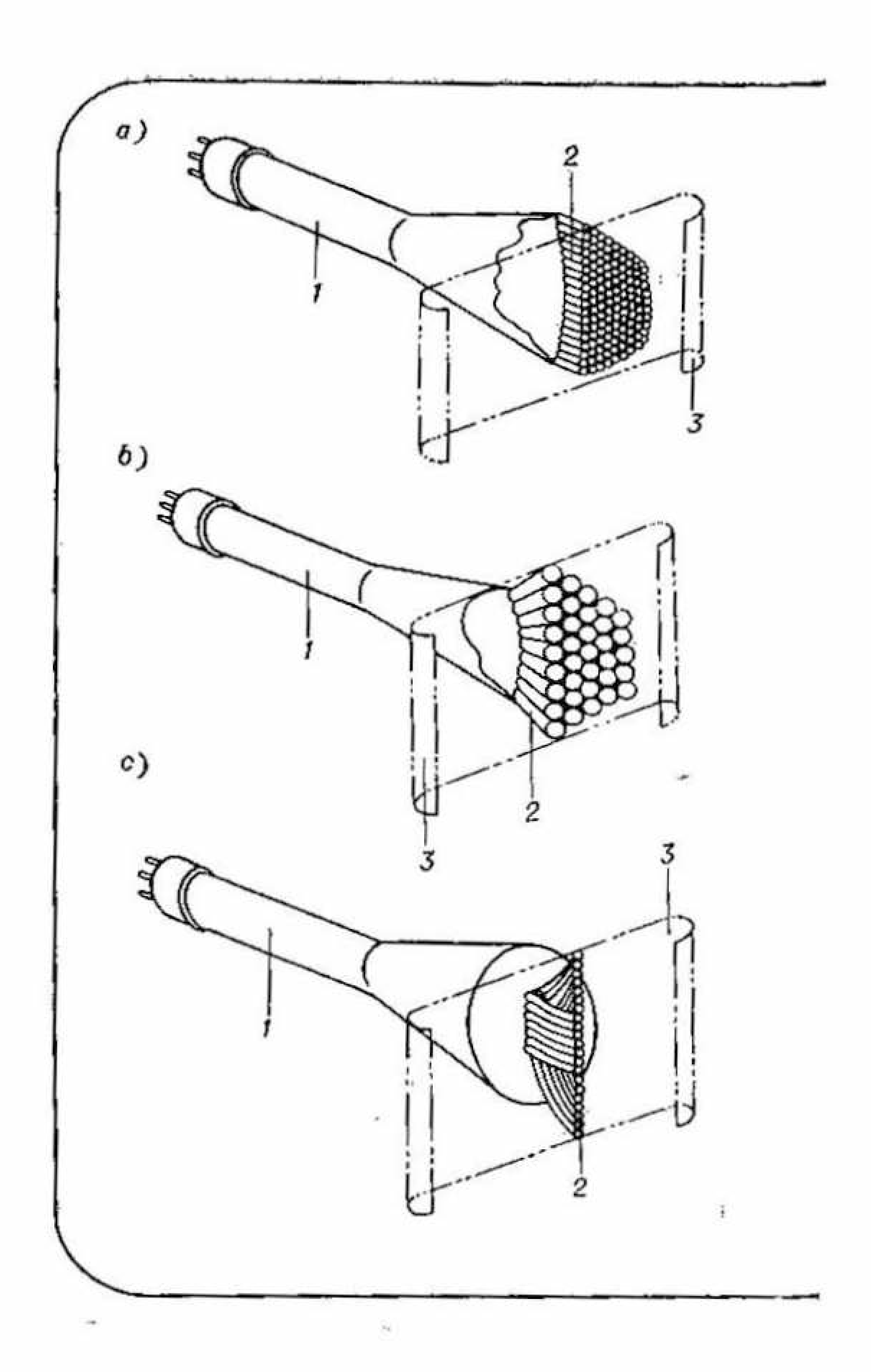


FIG. 97. Focones — lupas de fibras de contacto con las caras mayores convexa (a) y cóncava:
1—objeto; 2—focones; 3—pupila de salida

Lupas de contacto. Los focones superpuestos con su extremo estrecho sobre el objeto investigado (fig. 97) transmiten al extremo de salida su imagen aumentada. Este tipo de lupas no requieren enfoque. A diferencia de las lupas comunes, la imagen transmitida por el focón es real y directa y se encuentra sobre el plano del extremo de salida. Mientras más grande sea el aumento de las lupas focones, menor es la abertura de los rayos emergentes que portan la imagen del objeto. Estas lupas transmiten la imagen de objetos tanto luminosos como opacos. En este último caso, la iluminación se realiza por parte del observador, o sea, a través del extremo mayor: la luz va a través de las fibras, se refleja del objeto y regresa al extremo mayor. El aumento de las lupas focones de contacto puede ser de 2 a 6 veces.

Elementos de fibra en la fabricación de dispositivos electronoópticos. La ventana frontal de los tubos de los rayos catódicos *1* en forma de un haz de conductos de luz dispuestos en paralelo con una superficie cóncava *2* (fig. 98, *a*) corrige la curvatura del campo de la imagen electrónica y transmite esta imagen de la superficie interna


a)
2
1
3
b)
1
2
3
c)
3
1
2

de la ventana del cinescopio, la cual ha sido recubierta por un luminóforo a la superficie externa. Esto permite, en lugar de la fotoimpresión de proyección de la pantalla de los tubos de rayos catódicos, emplear un registro fotográfico de la imagen en contacto en la película *3*, la cual exige una exposición menor en varias decenas de veces. En la fig. 98, *b* se representa un cinescopio con una ventana frontal de focón la cual corrige la curvatura del campo de la imagen electrónica y la transmite con un aumento de escala a la película *3*. Estos focones pueden, a la vez, corregir también la distorsión de la imagen electrónica. Son muy variadas las versiones posibles de construcción de esquemas de los sistemas electronoópticos que contengan en su composición elementos fibrosos de la cuarta clase.

Los convertidores electrónico-ópticos de imagen (CEO) están destinados para la amplificación del brillo de la imagen y para la transformación espectral de la radiación. En los CEO clásicos (fig. 99, *a*), el objetivo *2* forma la imagen del objeto *1* en el fotocátodo *3*, cuyo flujo de electrones se amplifica y forma la imagen en el luminóforo *6*. Este tipo de CEO monocámara amplifica el brillo de la imagen de 100 a 150 veces. Sin embargo, debido a que las superficies del fotocátodo y del luminóforo son planas y que el campo de la imagen electrónica es curvilíneo, el poder resolutivo *R* de estos CEO es grande en el centro del campo de visión y decrece en los extremos del campo.

⟵

FIG. 98. Ventanas frontales de fibras en los tubos de rayos catódicos:
a — corrección de la curvatura de la imagen electrónica por medio de un haz de conductos de luz paralelos; *b* — por medio de un focón que se dilata; *c* — transformación de la imagen en una línea.

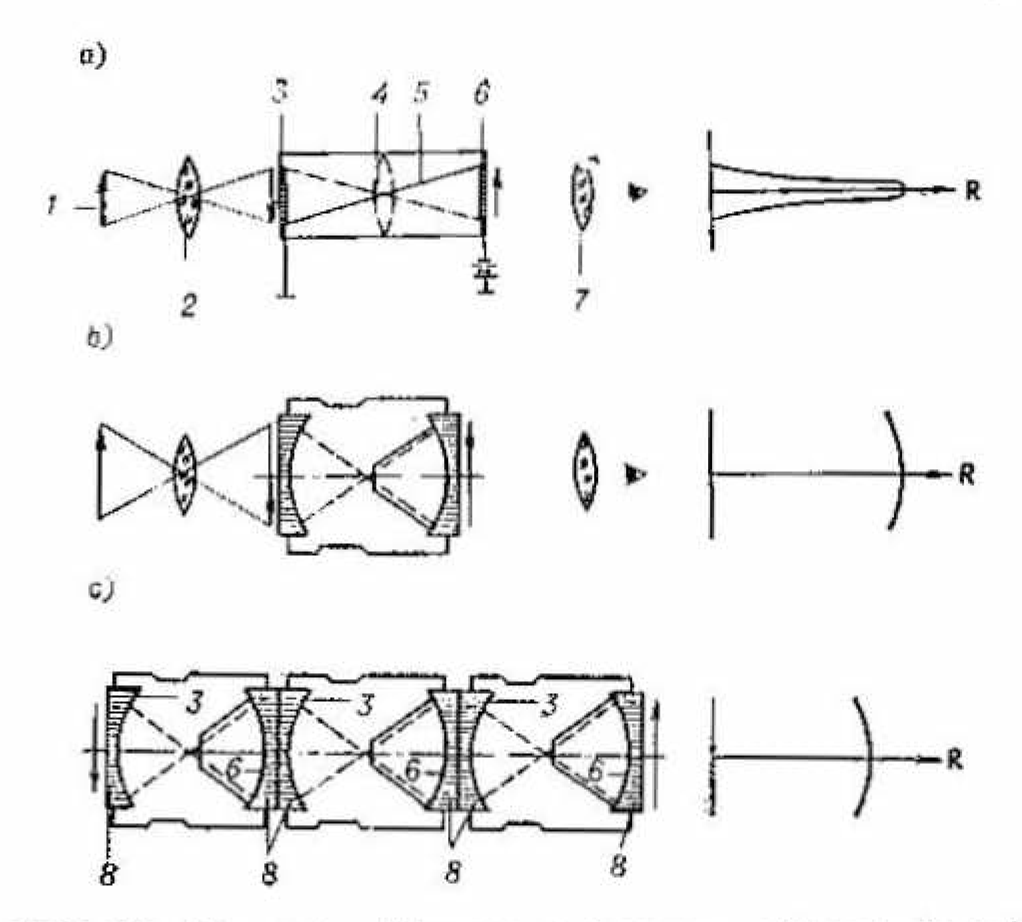


FIG. 99. Elementos fibrosos en los convertidores electrónico-ópticos:

1—objeto; 2—objetivo; 3—fotocátodo; 4—lente electrónica; 5—recorrido de los rayos electrónicos; 6—luminóforo; 7—ocular; 8—elementos fibrosos de variación de la curvatura del campo de imagen

Si en calidad de ventanas de entrada y de salida del CEO se utilizan los convertidores de fibras de curvatura del campo (fig. 99, *b*), sobre cuyas superficies cóncavas se superponen respectivamente el fotocátodo y el luminóforo, el poder resolutivo hacia el extremo del campo de visión aumenta bruscamente y disminuye un poco en el centro. En la fig. 99 a la derecha se indica la distribución del poder resolutivo R de los CEO en le ventana de salida.

Este brusco aumento del campo de información de los CEO con convertidores de fibras es una ventaja cualitativa, por lo cual a veces des-

precian que el efecto de transmisión de luz del haz de conductos de luz es de 1,3 a 2 veces menor que la transmisión de luz por las ventanas monolíticas de vidrio de los CEO clásicos. Debido a la corrección de la curvatura del campo de la imagen electrónica por medio de elementos fibrosos de la cuarta clase no solamente aumenta bruscamente el campo de información útil a la salida del CEO, sino que además la ventana de fibras de salida permite realizar un registro fotográfico de contacto de la imagen, eliminar la paralaje de la imagen durante la observación por el ojo humano y, lo que es muy importante, obtener, por acoplamiento directo a través de las ventanas de fibras (fig. 99, *c*) de varios CEO monocámaras, un CEO de policámaras con una alta amplificación de brillo de la imagen. Esto permite realizar las observaciones incluso por la noche.

Transformación de la imagen óptica con una conversión caótica de su estructura. Esta transformación se lleva a cabo fácilmente por medio de elementos fibrosos y es imposible realizarla utilizando los elementos de la óptica común. En la fig. 100, *a* se muestra el esquema de transmisión de la imagen por medio de un haz, rígido o flexible, de conductos de luz dispuestos regularmente en toda la longitud del haz. Las imágenes en la salida y en cualquier sección intermedia son semejantes. Si este haz de conductos de luz no tiene una disposición regular en su largo, entonces la estructura mosaica de aquél descompone la imagen en elementos (fig. 101) y a la salida de este haz se obtiene una «imagen» completamente distinta de la original. Sin embargo, si a esta imagen codificada se aplica este mismo u otro convertidor semejante completamente según el principio de disposición desordenada, este «caos» se hace ordenado y se realiza la descodificación o una restauración de la imagen inicial (fig. 102).

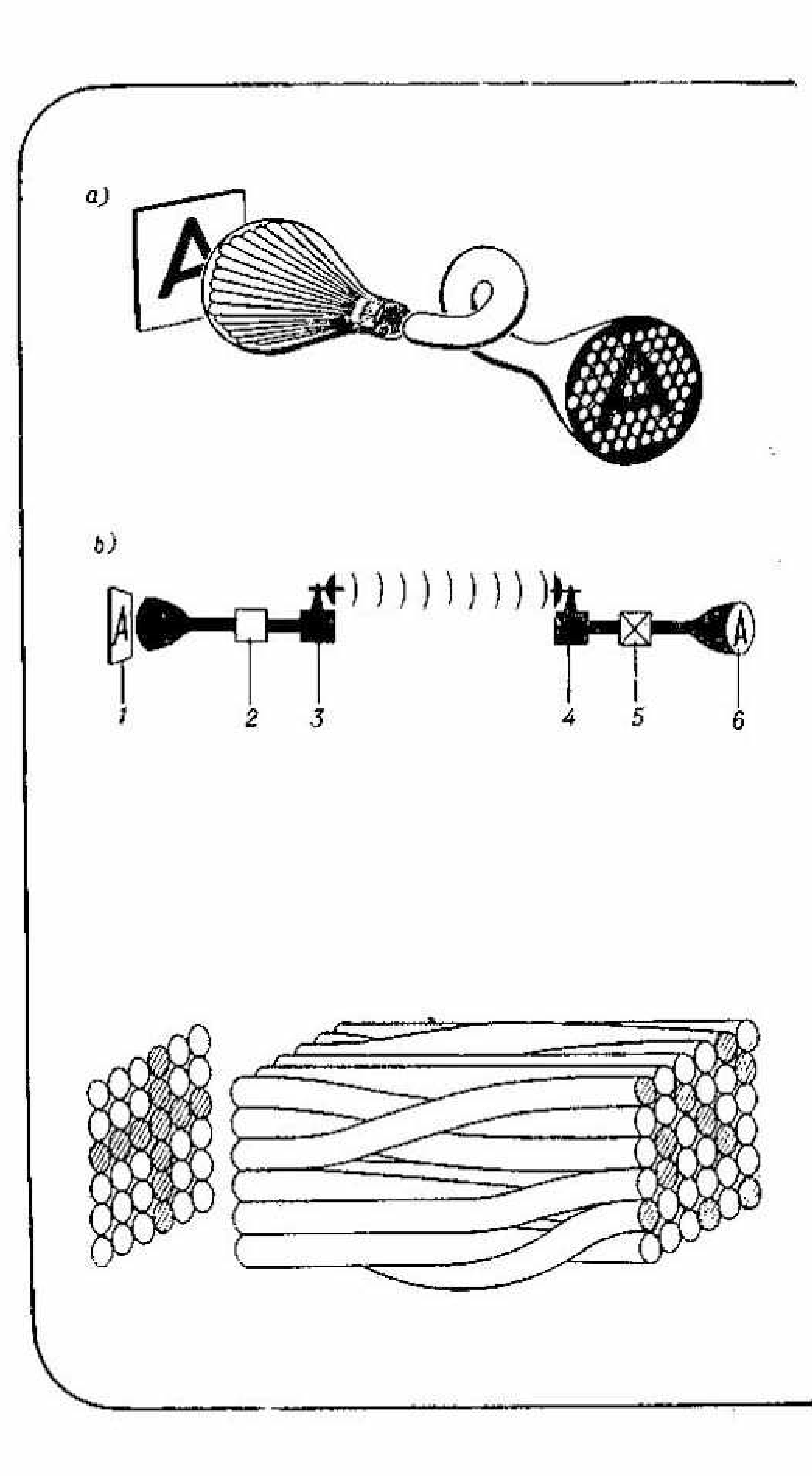

a)
A
A
b)
A
A
1
2
3
4
5
6

FIG. 100. Esquema de transmisión de la imagen por un haz de conductos de luz

←—

Este tipo de transformadores de fibras de la imagen óptica tiene mucho porvenir en la fabricación de instrumentos. En la fig. 100, *b* se muestra el esquema de transmisión de las imágenes cifradas por medio de elementos codificadores de conductos de luz: la imagen transmitida del objeto *1* se codifica por medio del haz de conductos de luz *2* y se transmite por el transmisor *3* a cierta distancia; la imagen codificada después del receptor *4* se descodifica por un haz de conductos de luz *5* análogo y a la salida se reproduce la imagen óptica *6* con un determinado grado de semejanza a la original. El grado de semejanza se determina generalmente por la calidad óptica de los elementos fibrosos codificadores y descodificadores.

Cámara cinematográfica de fibras sin cuadros. Un mismo elemento fibroso, en dependencia del método de su utilización en un dispositivo, puede ser incluido en diferentes clases. Como ya hemos visto, los haces regulares de fibras pueden indicarse como elementos de la primera clase si en el esquema del dispositivo desempeñan papel de canal transmisor de luz para la iluminación, y pertenecen a la segunda clase si se emplean para la transmisión de la imagen. Un caso análogo ocurre con los haces irregulares de conductos de luz. Por ejemplo, el convertidor de fibras de tipo rendija-mancha (fig. 81) se puede emplear no solamente para la conversión de la forma de la mancha luminosa, sino también para la transformación de la imagen óptica.

←—

FIG. 101. Principio de funcionamiento de un dispositivo codificador de fibras

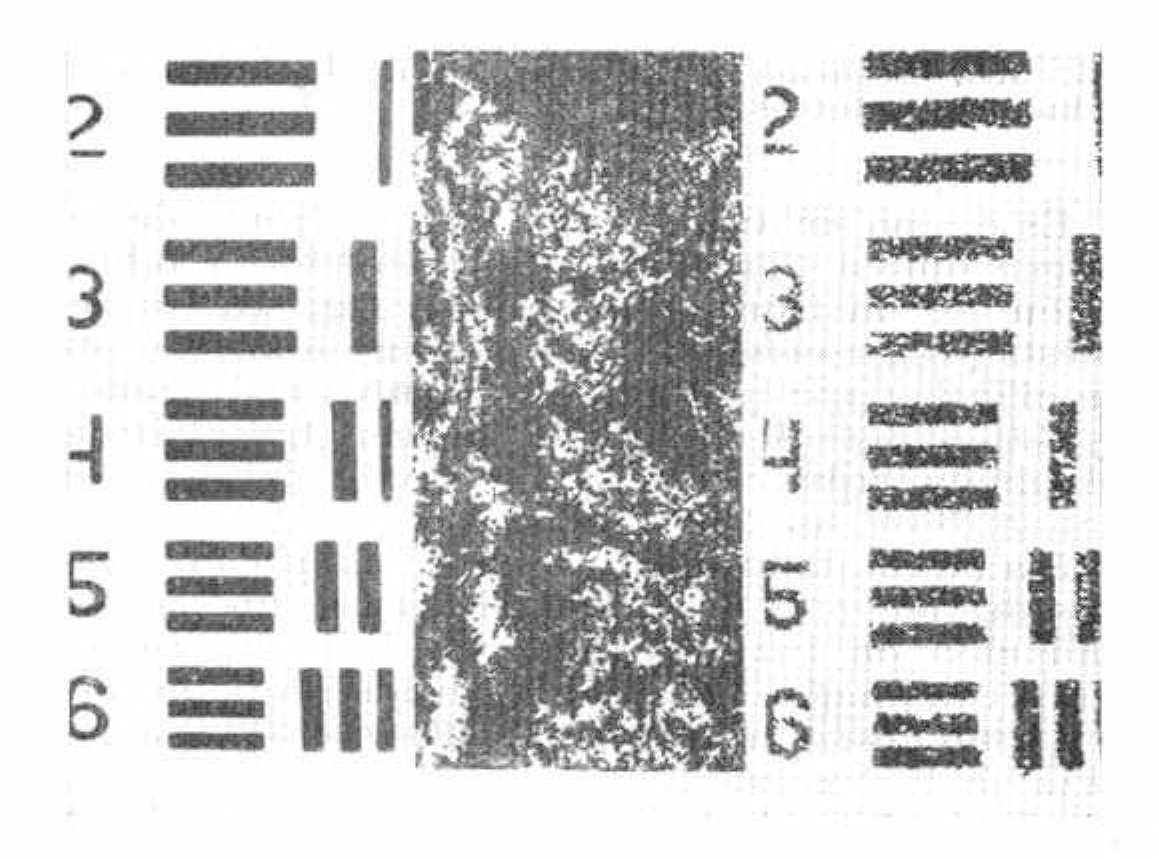
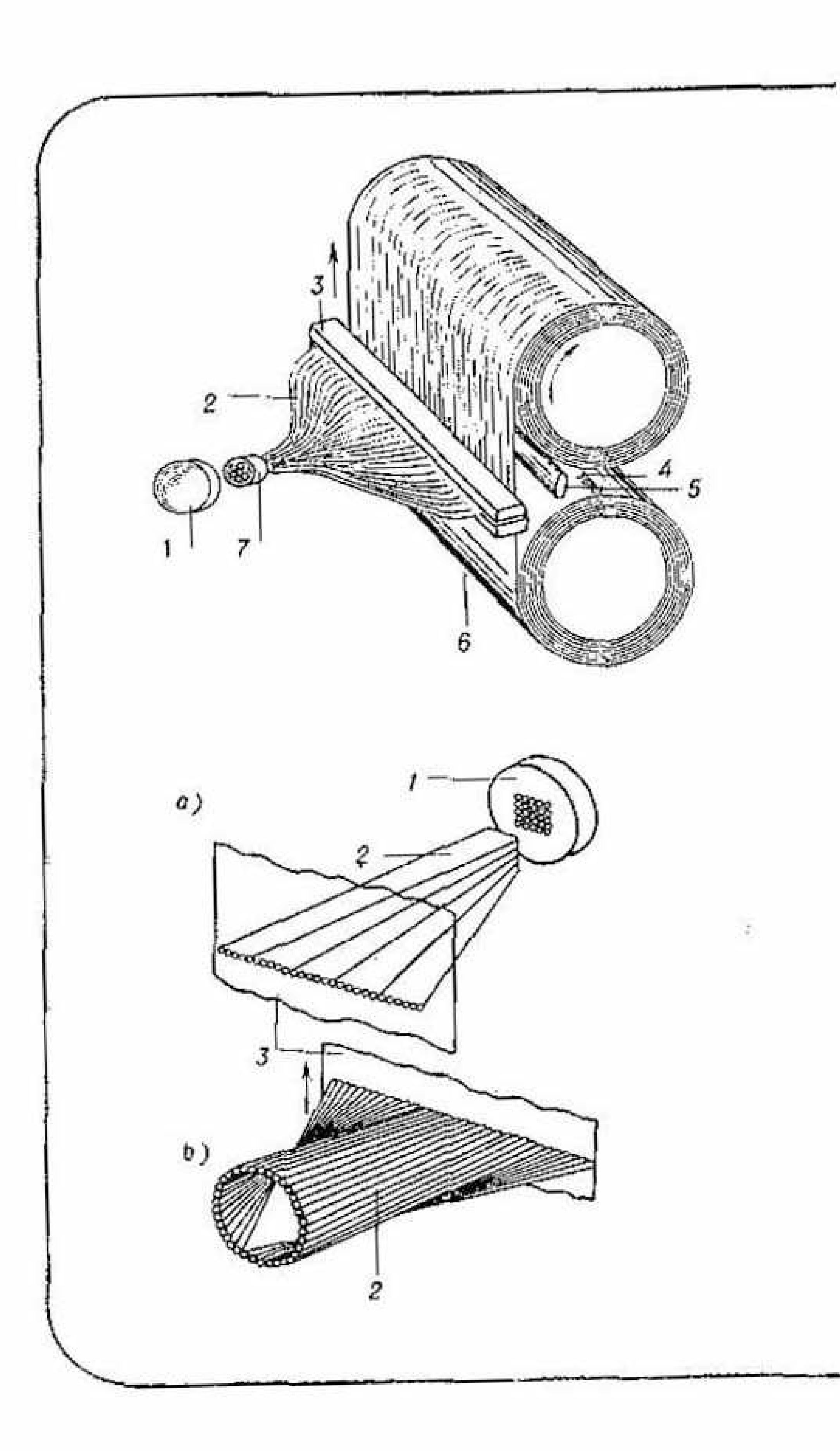


FIG. 102. Fotografías de un objeto: miras (*a*), su imagen codificada (*b*) y descodificada (*c*)

En la fig. 103 viene dado el esquema de una cámara filmadora en la cual la imagen varía suavemente. En un extremo del convertidor de fibras *2* todas las fibras están dispuestas en una fila. El objetivo *1* proyecta la imagen variable con el tiempo al extremo circular de entrada *7* del haz de fibras. En contacto con el extremo de salida *3*, se desplaza uniformemente la película *6*. Cada filamento imprime sobre la película una pista continua de oscurecimiento variable correspondiente a las variaciones de brillo del elemento dado de la imagen. Al revelar la película y hacer pasarla por este mismo aparato con este mismo convertidor de fibras, y al iluminarla por el extremo opuesto a través de la lente cilíndrica *5* y mediante la fuente *4*, en el extremo *7* obtendremos una distribución de luminosidad suavemente

variable y en la pantalla, una imagen variable uniformemente de los fenómenos filmados. El número de elementos de la imagen, durante la filmación y reproducción por medio de esta cámara filmadora, está limitado por el diámetro de los extremos de los filamentos conductores de luz y el poder resolutivo de la película.

Transformación de la imagen óptica con conversión regular de su estructura. Además de la transformación de la imagen óptica sin alterar su macroestructura (por ejemplo, véanse las figs. 90-92) o con una conversión caótica de su estructura (por ejemplo, véanse las figs. 101-103), los elementos fibrosos de la cuarta clase realizan la transmisión de la imagen óptica con una conversión de su estructura en determinada regularidad. En la fig. 104, *a* se muestra la conversión de la imagen del cuadro en la lineal; durante este proceso los elementos de cada línea del cuadro se encuentran en orden anterior y a ellos quedan contiguos los elementos de la segunda línea del cuadro, es decir, se forma una sola línea larga, pero con determinada regularidad correcta de la descomposición de los elementos de la imagen del cuadro en línea. En la fig. 104, *b* se indica una exploración regular en línea de elementos de la imagen de un anillo. Este tipo de transformadores regulares de fibras pueden realizar una conversión inversa. Los transformadores de fibras que se muestran en la fig. 104 se utilizan ampliamente para la transmisión de la imagen con conversión de las pantallas de aparatos de rayos catódicos sobre una película fotográfica. A la vez pueden utilizarse directamente como soporte-ventana para el luminóforo (fig. 98, *c*) o pueden utilizarse en contacto con la ventana frontal de fibras de los dispositivos de rayos catódicos, por ejemplo, los representados en la fig. 98, *b* en los cuales, entre otras cosas, el haz de electrones en el tubo de



3
2
1
7
4
5
6
a)
1
2
3
b)
2

FIG. 103. Esquema de una cámara cinematográfica sin ventana de fotograma con un convertidor de fibras

<-----

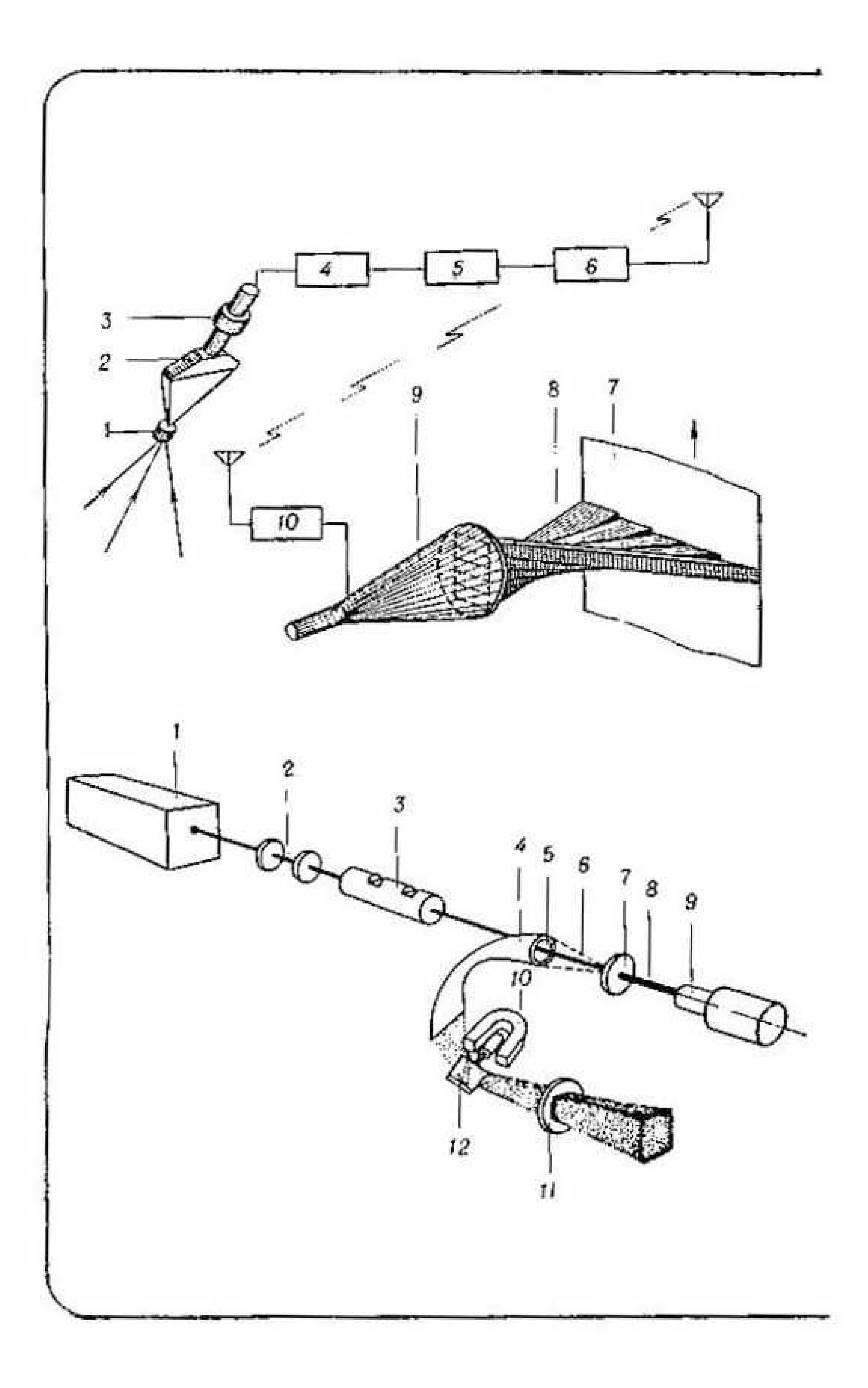
rayos catódicos puede realizar un *barrido* lineal alterno (fig. 104, *a*) o circular (fig. 104, *b*).

Como ejemplo de utilización de los transformadores de fibras del tipo antes visto, puede servir el *sistema óptico electrónico de reconocimiento aéreo del terreno* (fig. 105): el sector del terreno en reconocimiento se proyecta por medio del objetivo *1* al extremo extendido de entrada del convertidor *2*, cuya imagen lineal larga se transforma en forma rectangular o en cuadro. La exploración del campo de visión en dirección perpendicular a la línea de entrada larga del convertidor de fibras *2*, se efectúa por medio del desplazamiento del aparato en vuelo. El extremo rectangular de salida se encuentra en contacto óptico con la ventana de salida del dispositivo de rayos catódicos o superorticón *3*. La imagen del blanco del superorticón se conmuta con el haz electrónico y se transforma en una señal de video; esta última se transmite por el sistema receptor terrestre dotado del tubo de rayos catódicos *9* con una ventana frontal de fibras en contacto con la cual se acopla el convertidor de imagen *8*, análogo al dispuesto en el aparato transmisor *2*. El convertidor de fibras *8* reproduce la imagen del sector del terreno transmitido por el objetivo *1* a la entrada del convertidor *2*. La película *7* se desplaza en contacto con el extremo lineal de salida del convertidor de fibras *8*, en

<-----

FIG. 104. Transformadores de fibras de la imagen óptica: *a* — conversión de una trama en una línea; *b* — conversión de una exploración circular en una lineal:

1 — superorticonoscopio; *2* — convertidor de fibras; *3* — película fotográfica



4
5
6
3
2
1
9
8
7
10
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
12
11

FIG. 105. Sistema de reconocimiento aéreo del terreno con óptica de fibras:

1—objetivo; *2*, *8*—convertidor de fibras de la forma del cuadro; *3*—superorticón con la ventana de fibras; *4*—bloque de formación de una señal de video; *5*—amplificador de la señal; *6*—transmisor; *7*—película fotográfica; *9*—cinescopio receptor; *10*—receptor de una estación terrestre

←——

forma sincrónica con el movimiento del aparato volador. Sobre esta película se reproduce la imagen del terreno.

La utilidad efectiva de los elementos de la cuarta clase en la fabricación de aparatos se puede ver en el ejemplo del *sistema mecánico-óptico de barrido* del rayo de láser (fig. 106): la radiación de láser *1* a través de las lentes *2* y del modulador *3* incide en el espejo *7*, realizando un barrido cónico gracias a la conexión con la varilla de resonancia *8* y con el convertidor piezoeléctrico *9*. El espejo *7* realiza también un barrido circular del rayo de láser, reflejándolo al extremo anular del convertidor de fibras *4*. El extremo de salida de este último es una línea recta. En un período completo de oscilación del espejo *7* la mancha luminosa recorre a lo largo de todo el extremo de salida. Con esto se logra de una forma extraordinariamente simple el barrido por líneas del rayo de láser. El convertidor regular de fibras de anillo a línea permite realizar un barrido circular gracias a lo cual quedan excluídas las pérdidas de tiempo en el trayecto de regreso del rayo. El barrido por cuadros se lleva a cabo por medio del espejo *12* que oscila por el electroimán *10*.

←——

FIG. 106. Sistema mecánico-óptico de exploración del rayo de láser:

1—láser; *2*—lentes; *3*—modulador; *4*—elemento fibroso; *5*—rayo de láser; *6*—rayo de láser cónico de exploración reflejado; *7*—espejo de explorador; *8*—eje de resonancia; *9*—convertidor piezoeléctrico; *10*—bloque de exploración por cuadros; *11*—lente; *12*—espejo

14. OTRAS CLASES DE ELEMENTOS FIBROSOS

Como se puede observar en la tabla 6, la difusión relativa de sistemas de conductos de luz de la quinta a la décima clases no es muy grande en la fabricación de aparatos: menos del 11% de la totalidad de todos los elementos de fibras utilizables y en elaboración. Esto se explica no sólo por las cualidades y ventajas de los elementos fibrosos de la primera, segunda, cuarta y sobre todo, de la tercera clases, y porque las posibilidades técnicas y la eficiencia de los elementos de la quinta a la décima clases han empezado a descubrirse sólo en los últimos años; además de esto, el grado de su realización tecnológica es por el momento relativamente bajo. En la actualidad se llevan a cabo investigaciones intensivas sobre los parámetros de estas clases de elementos fibrosos con el fin de adaptarlos a los dispositivos y se efectúan elaboraciones tecnológicas para utilización en variantes óptimas.

Quinta clase: elementos selectores de fibras. En esta clase de elementos (esquema 5) se incluyen los sistemas de conductos de luz transparentes en un intervalo estrecho de longitudes de ondas en las bandas ultravioleta, visible o infrarroja del espectro: haces de conductos de luz monocromáticos, sistemas de fibras tricromáticos, haces de fibras policromáticos, elementos de conductos de ondas transparentes en la banda ultravioleta del espectro, por ejemplo, en el intervalo de 0,20 a 0,35 μ, o en la banda infrarroja del espectro, por ejemplo, en intervalos de 1,0 a 5,0; 6 a 14 ó 1 a 15 μ y otros.

Fibroóptica infrarroja. Veremos solamente un ejemplo de utilización de las fibras infrarrojas en la fabricación de instrumentos. El desarrollo de la microelectrónica planteó el problema de

Esquema 5

- Quinta clase — elementos fibrosos selectivos
  - Ultravioletas, transparentes con intervalos de longitudes de ondas (en μ)
    - 0,2—0,32
    - 0,32—0,40
    - 0,35—0,40
    - 0,2—0,4
  - En colores transparentes en varias zonas del espectro
    - Cuando λ = 0,40 μ
    - Cuando λ = 0,42 μ
    - Azul
    - Verde
    - Roja
  - Infrarrojos, transparentes con intervalo de longitudes de ondas (en μ)
    - 0,8—1,1
    - 1—6
    - 6—14
    - 1—15
  - Policromáticos, transparentes en varias zonas del espectro
    - Azul, verde, roja
    - Ultravioleta y visible
    - Visible e infrarroja
    - Ultravioleta, visible e infrarroja

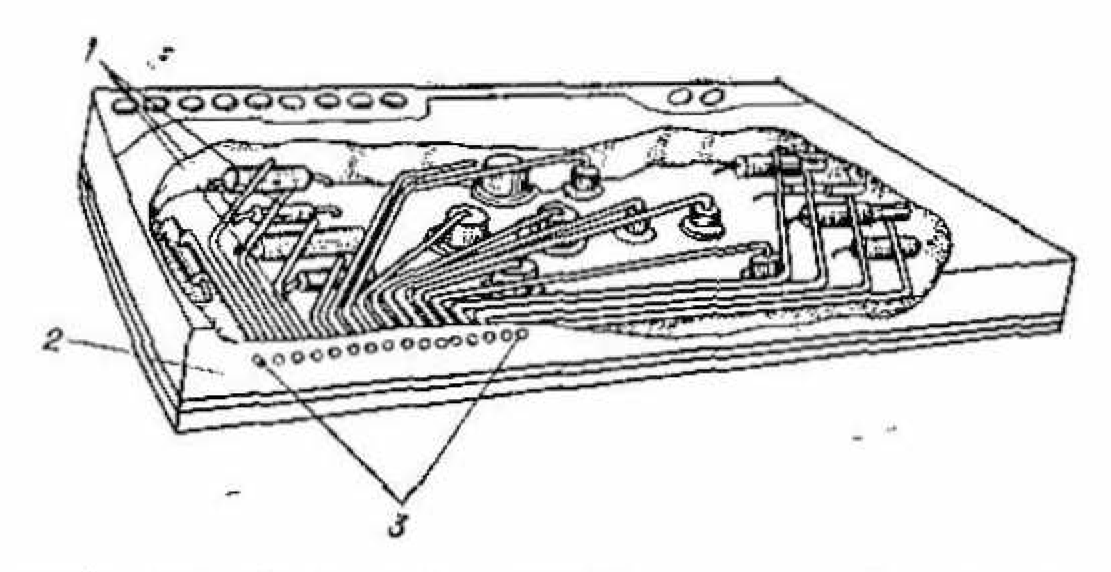


FIG. 107. Sistema termográfico con empleo de fibras infrarrojas ópticas

realizar el control automático del estado de microcomponentes aislados en los dispositivos microelectrónicos en condiciones de trabajo. El empeoramiento de los parámetros de los microcomponentes generalmente va acompañado de una variación de su radiación total infrarroja debido a la variación de temperatura de trabajo de ellos. En esta dependencia se basa el principio (método) de termografía en rayos infrarrojos: la toma del termograma del microcomponente controlado y la revelación de las anomalías térmicas debidas a los defectos de construcción o defectos de producción o al envejecimiento de las piezas.

La parte fundamental de un sistema termográfico la constituyen las fibras ópticas *1*, las cuales son transparentes en la banda infrarroja del espectro (fig. 107). Por medio de éstas se lleva a la superficie exterior del dispositivo microelectrónico *2* una parte de la radiación infrarroja de los elementos controlados: transistores, resistencias, uniones de contacto, etc. En los extremos exteriores *3* de las fibras infrarrojas barre periódicamente un radiómetro infrarrojo, el cual mide la intensidad de la radiación, o sea, la tempe-

ratura de diferentes elementos del sistema. Estas fibras se fabrican a base de vidrios sulfuroso-arseniosos que hacen pasar la radiación infrarroja en una banda de 1,5 a 8 μ, permitiendo medir la variación de la temperatura en los límites entre 30 y 200° C. Los parámetros del radiómetro aseguran una exactitud en la medición de la temperatura hasta 1° C. La abertura numérica de las fibras infrarrojas es mucho mayor que 1; esto da la posibilidad de concentrar y transmitir al radiómetro una cantidad de radiación infrarroja igual a la cantidad que se transmite en los dispositivos infrarrojos de medición corrientes desde una superficie emisora que supera varias decenas de veces la sección de la fibra.

Las fibras infrarrojas se utilizan para la medición a distancia de temperaturas en lugares de difícil acceso o peligrosos, donde los parámetros comunes no pueden usarse. Las ventajas del método de termografía de la fibroóptica radican en la simplicidad, universalidad y efectividad, en la alta exactitud, construcción compacta y en la posibilidad de automatización de la elaboración de los datos obtenidos.

Elementos tricromáticos de fibras. Desde el 1 de octubre de 1967 en la URSS comenzaron las transmisiones regulares de televisión a colores. La pantalla a colores del tubo de televisión está compuesta de líneas verticales, que alternan según el color de la luminiscencia: rojo, verde y azul. Las cámaras transmisoras a colores modernas son complejas en su construcción y se basan en tres o cuatro tubos transmisores. Los especialistas soviéticos se pusieron como meta la creación de una cámara unitubular a colores a base de un tubo del tipo vidicón. Para una solución cardinal de este problema se propuso el empleo de haces de conductos de luz de estructura regular en forma de rayas alternadas de haces de

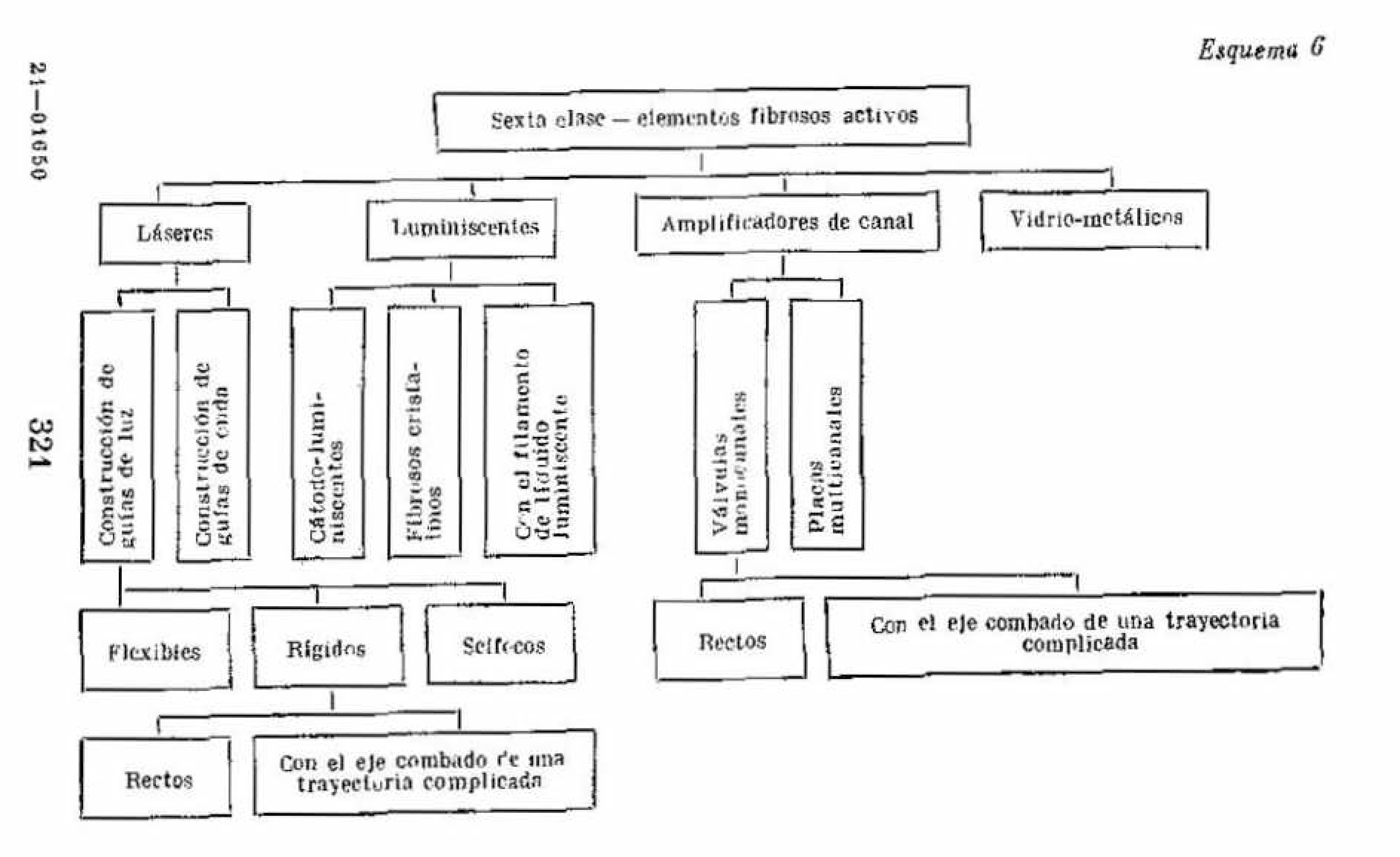
fibras: rojos, verdes y azules. La anchura de las bandas verticales de fibras de cada color beberá corresponder al diámetro (20—120 μ) del haz electrónico de exploración del tubo. Este tipo de vidicón a colores de fibras resuelve a la vez una serie de problemas de la televisión a colores, simplifica notoriamente todo el sistema en general y permite realizar la televisión a colores a base de uno o dos tubos de rayos catódicos en vez de los tres o cuatro utilizados en las cámaras modernas de transmisión.

Haces de conductos de luz policromáticos. Estos consisten en un conjunto de haces de conductos de luz polifilares axialmente simétricos, compuestos de filamentos conductores de luz en diferentes zonas del espectro: algunos filamentos son transparentes en una zona ultravioleta del espectro, otras en la zona ultravioleta cercana, los terceros en la azul, los cuartos en la verde, los quintos en la roja, etc, o sea, este conducto de luz polifilar y también el haz respectivo de estos conductos, es transparente en un intervalo muy ancho de longitudes de ondas, desde 0,20 hasta 20 μ, por ejemplo.

La información transmitida por el haz policromático de conductos de luz se analiza por medio de fotorreceptores lenta o rápidamente cambiables los cuales tienen una sensibilidad sólo en determinado intervalo de longitudes de ondas, o únicamente por medio de un solo receptor para seleccionar la información en un intervalo requerido y en un momento dado de longitudes de ondas de radiación.

Sexta clase: elementos fibrosos activos. A esta clase de elementos (esquema 6) pertenecen los sistemas de conductos de luz que realizan una conversión espectral de la radiación transformada, por ejemplo, ultravioleta, en luz visible, o los sistemas amplificadores del brillo de la señal

Esquema 6


Sexta clase — elementos fibrosos activos
Láseres
Luminiscentes
Amplificadores de canal
Vidrio-metálicos
Construcción de guías de luz
Construcción de guías de onda
Cátodo-luminiscentes
Fibrosos cristalinos
Con el filamento de líquido luminiscente
Válvulas monocanales
Placas multicanales
Flexibles
Rígidos
Selfocos
Rectos
Con el eje combado de una trayectoria complicada
Rectos
Con el eje combado de una trayectoria complicada

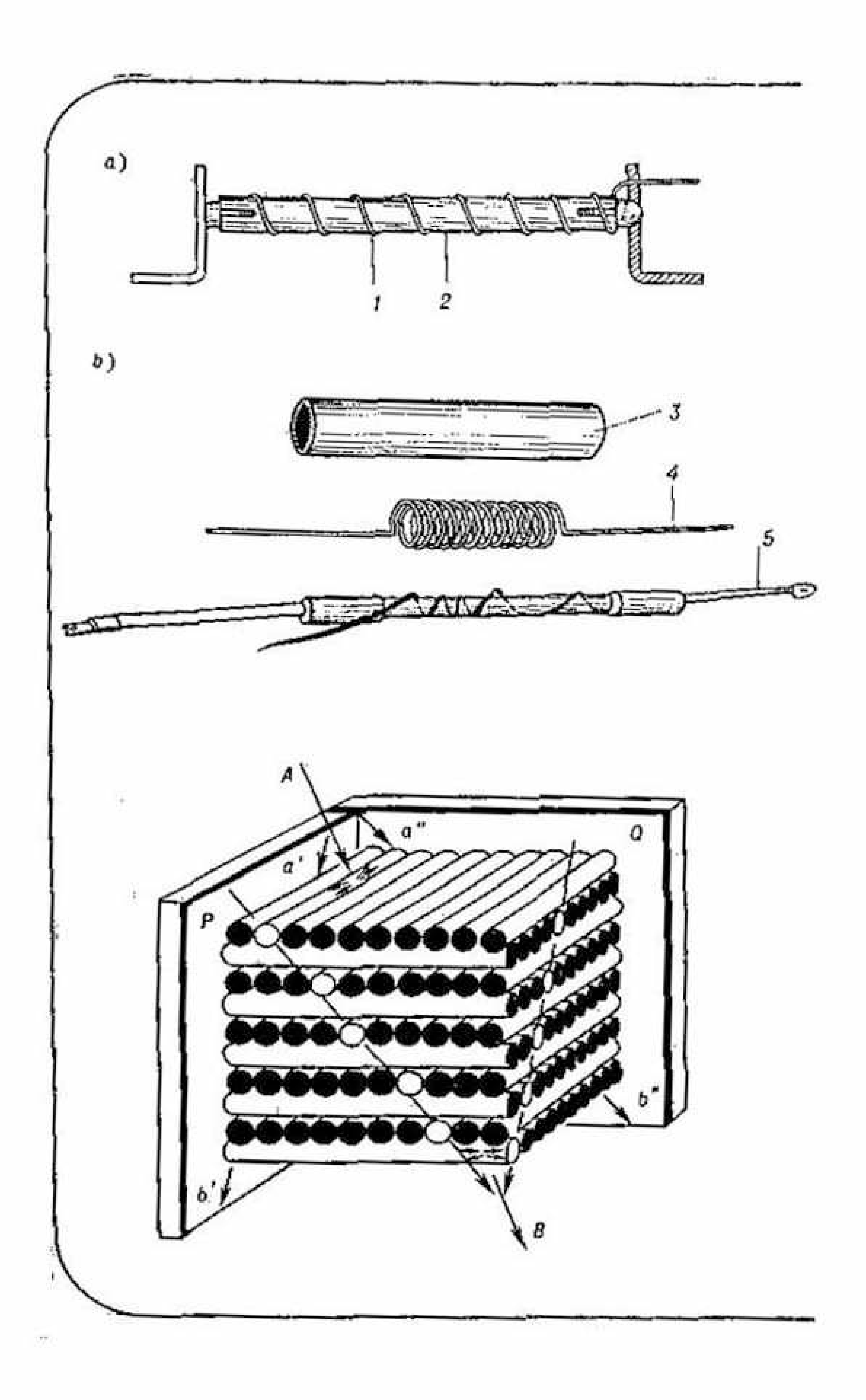

a)
1
2
b)
3
4
5
A
a''
Q
a'
P
b''
b'
B

FIG. 108. Láser de fibras: *a* — esquema del sistema de excitación; *b* — elementos principales:
1,4 — láser de fibras; *2,5* — lámparas de flash; *3* — reflector
←—

luminosa transmitida, o los sistemas que resuelven a la vez ambos problemas: conversión espectral y amplificación de potencia. Como ejemplo de este tipo de elementos sirven los conductos de luz de centelleo, los láseres de fibras, los haces de fibras metalovidriosos, los conductos de luz de cátodos luminiscentes, los elementos cristalofibrosos, las placas microcanálicas y otros.

Láseres de fibras. Un conducto de luz de vidrio cuyos filamentos contienen en el vidrio neodimio, puede generar una radiación láser de longitud de onda de cerca de 1,06 μ. En la lámpara relámpago *2* (fig. 108) se enrolla una fibra activada con neodimio *1*. Para una utilización más completa de la radiación de la lámpara *2*, ésta se dispone junto con el láser de fibra *1* dentro del cilindro reflector *3*. Al ocurrir el destello de la lámpara *2* su radiación excite la fibra *1* y por el extremo de salida de ésta sale un rayo brillante potente de láser. Los láseres de fibras se utilizan no sólo para generar su radiación propia, sino además en calidad de amplificadores de láseres de fibras de radiación de otros láseres, incluyendo el generador de fibras. En este último caso el generador de radiación de fibras y el amplificador de conductos de luz de rayo láser se conectan en serie. La ventaja de los láseres de fibras consiste en la gran relación entre la superficie de las fibras y su volumen, lo que mejora esencialmente la solución de problemas de refrigeración del medio activo en el proceso de trabajo de los láseres. Además, las fibras pueden tomar cualquier forma, lo que facilita crear los láseres

←—
FIG. 109. Centelleador de fibras ópticas

compactos de pequeñas dimensiones, por ejemplo, para los sistemas optoelectrónicos, cibernéticos y computadores electrónicos.

Los láseres de fibras se fabrican en forma de una construcción de conductos de luz (en este caso el rayo láser se difunde dentro del filamento conductor de luz) y en forma de guías de ondas. En estos últimos la mayor parte de la energía del rayo láser se difunde fuera de la fibra, lo que permite realizar una interconexión por guía-ondas con los láseres de guías de ondas o adyacentes y de esta forma crear esquemas lógicos variados para los sistemas cibernéticos.

Fibras luminiscentes. En la física nuclear se utilizan las cámaras luminiscentes para localizar y registrar vestigios de partículas y para medir su intensidad. Las fibras ópticas de material luminiscente se disponen en capas alternas perpendiculares entre sí. En contacto con los extremos de salida se disponen las películas fotográficas P y Q (fig. 109). Al pasar una partícula activa por este haz de fibras, por ejemplo, en la trayectoria AB, se genera la luminiscencia de aquellas fibras que son atravesadas por dicha partícula. La luz de las fibras excitadas se transmite a los extremos de éstas y en las películas fotográficas recíprocamente perpendiculares se registran las proyecciones $a'b'$ y $a''b''$ de la trayectoria de la partícula en los planos P y Q, por medio de los cuales se puede fácilmente determinar la intensidad y trayectoria en el espacio tridimensional.

En la actualidad, se llevan a cabo investigaciones para la creación de materiales luminiscentes de alta efectividad. Con las fibras luminiscentes de vidrio que hace poco han sido creadas es posible la fabricación de elementos herméticos al vacío para su utilización en calidad de ventanas de entrada en los convertidores de imagen.

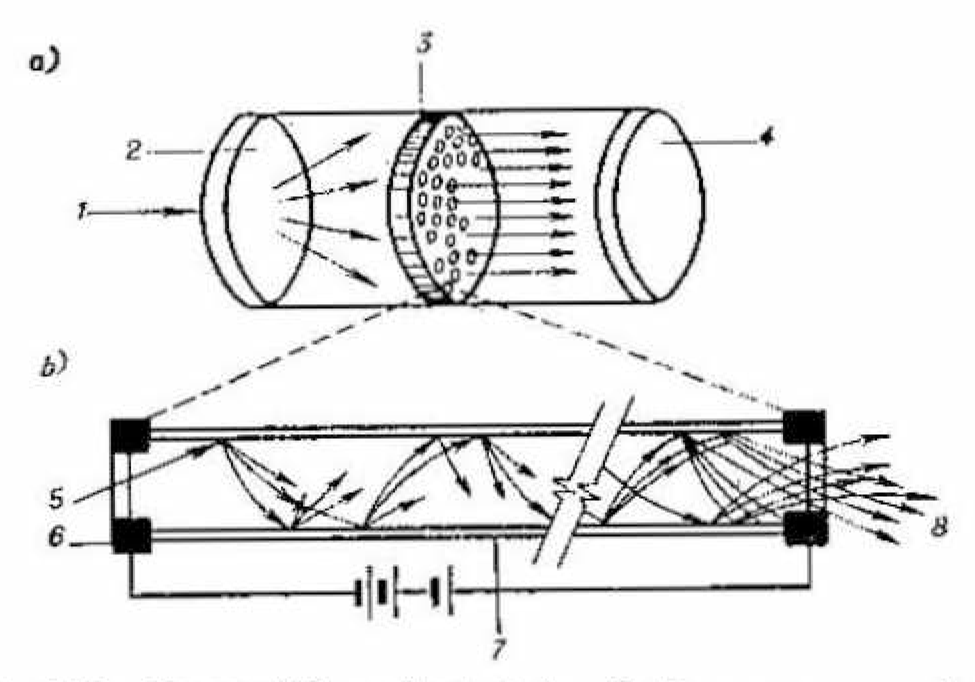


FIG. 110. Convertidor electrónico-óptico con una placa microcanálica: *a* — imagen esquemática del dispositivo; *b* — esquema do la multiplicación de electrones en un canal:

1—radiación; 2—fotocátodo; 3—placa microcanálica; 4—pantalla luminiscente; 5—entrada del canal; 6—contacto; 7—canal unitario; 8—salida de canal

Especial interés tienen los materiales de cátodo luminiscente y fibrocristales los cuales al ser irradiados por un haz electrónico generan luz visible de diferentes colores; éstos han sido creados por los especialistas soviéticos. Su empleo en la fabricación de aparatos electronoópticos elimina la necesidad de aplicar los luminóforos. Para la generación y transmisión de la luz tienen buenas posibilidades las fibras capilares huecas, rellenas de luminóforos o de líquidos luminiscentes.

Placas microcanálicas. Estas consisten en un elemento fibroso activo del cual en todo el campo han sido extraídos los filamentos conductores de luz, o sea, se trata de un haz de canales de vidrio huecos dispuestos en paralelo, de diámetro entre 5 y 40 μ. La superficie interna de los

canales tiene una alta resistencia y un coeficiente de emisión secundaria del orden de 3 a 5. Las placas microcanálicas se emplean, por ejemplo, en los convertidores electronoópticos (véase la fig. 99). En estos últimos, en el trayecto del flujo electrónico que porta y forma la imagen electrónica se dispone una placa de microcanales, y a sus extremos se aplica una tensión del orden de 2 a 3 kV. Los electrones del fotocátodo *2*, al incidir en lo interior del canal *7* de la placa de microcanales *3* (fig. 110), chocan contra sus paredes generando una emisión de electrones secundarios. Estos son guiados por el campo interno de cada canal y realizan, a medida que se desplazan, una serie de actos de emisión secundaria, como resultado de lo cual el flujo electrónico a la salida del canal supera varias veces el flujo de entrada. Para una amplificación más efectiva debida a la emisión secundaria es necesaria una relación entre la longitud y el diámetro del canal entre 50 a 100.

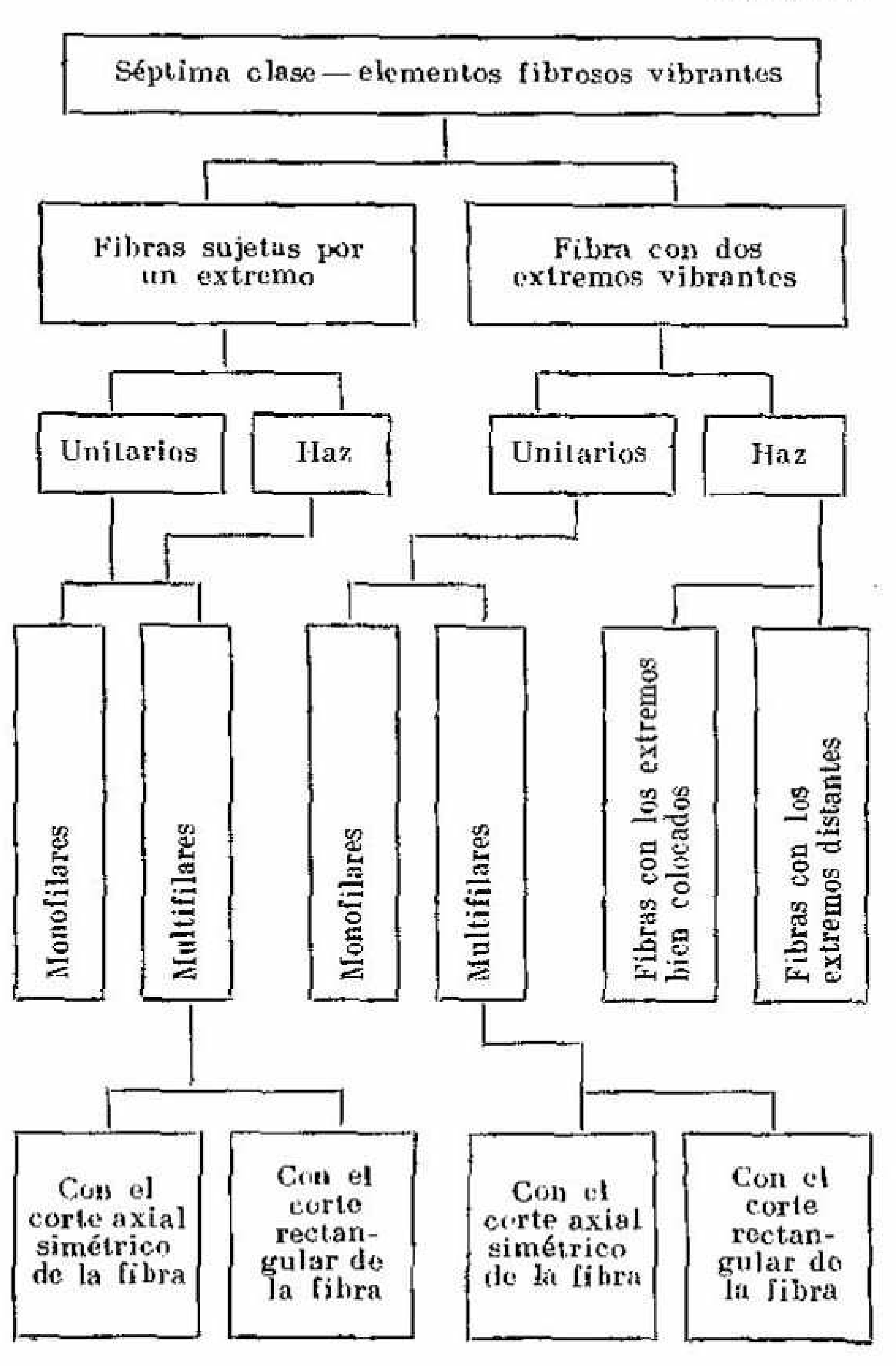
El coeficiente de amplificación del convertidor electronoóptico con una placa microcanálica es igual a 10^4—10^6. El flujo electrónico de salida de cada canal excita la pantalla luminiscente *4*, sobre la cual se forma la imagen del objeto transformada en espectro y amplificada esencialmente en brillo. El poder resolutivo de los dispositivos electronoópticos con placas microcanálicas se determina en general por el diámetro de los canales, es decir, por el paso de la estructura. La amplificación del flujo electrónico en los convertidores electronoópticos con placas microcanálicas es igual e incluso algo mayor que la amplificación de los CEO de tres cámaras (fig. 99, *b*). Este último tiene mayores dimensiones, peso y costo. Todas las ventajas antes indicadas de las placas microcanálicas han sido básicas para su amplia utilización en los dispositivos electronoópticos.

Séptima clase: elementos fibrosos vibratorios. A este tipo (esquema 7) pertenecen los sistemas de conductos de luz empleados en dispositivos de régimen dinámico, es decir, sistemas de vibración por la acción de una señal externa y que transforman a la vez la información de luz; este tipo de elementos son, por ejemplo, los vibroendoscopios a base de fibras unitarias y polifilares, ceptrones-analizadores de fibras optoacústicos y otros más.

Vibroendoscopios para la transmision de la luz y la imagen. Para transmitir la luz por medio de pequeños canales curvos con el fin de iluminar un área que supere muchas veces la sección del pequeño canal, se utilizan fibras flexibles monofilares en el extremo de entrada da las cuales se concentra una radiación poderosa; a los extremos de salida de las fibras dispuestas en el canal pequeño curvo se les imprime un movimiento vibratorio desordenado con una amplitud mucho mayor que el diámetro de la fibra. Con esto se logra la iluminación de un área relativamente grande.

Una fibra monofilar unitaria o una fibra flexible multifilar de sección axial simétrica o de sección de forma rectangular en líneas son utilizadas para la transmisión de la imagen desde un área que supera muchas veces su sección transversal. Para lograr esto a ambos extremos de la fibra se comunica un movimiento oscilatorio sincrónico y cofásico, con una frecuencia de oscilaciones mayor que la perceptible por la vista 'iumana. Si el diámetro de una fibra monofilar o el de un filamento de una fibra multifilar corresponden a 2 ó 3 μ, se obtiene un poder resolutivo alto para este vibroendoscopio, cerca de 300 — 400 líneas/mm. Además, a través de la unidad de la sección transversal de estos vibroendoscopios se puede transmitir mayor volumen de información que a través de un haz de fibras con

Esquema 7


Séptima clase — elementos fibrosos vibrantes
Fibras sujetas por un extremo
Fibra con dos extremos vibrantes
Unitarios
Haz
Unitarios
Haz
Monofilares
Multifilares
Monofilares
Multifilares
Fibras con los extremos bien colocados
Fibras con los extremos distantes
Con el corte axial simétrico de la fibra
Con el corte rectangular de la fibra
Con el corte axial simétrico de la fibra
Con el corte rectangular de la fibra

un área de la sección igual a la superficie investigada. Sin embargo, el volumen total de la información transmitida, debido a la pequeñez del área investigada durante la vibración, y el valor medio de la transmisión de luz con el tiempo (aunque es alta la transmisión de luz de la misma fibra) son bajos. Estas dos causas limitan las posibilidades de utilización de los vibroendoscopios a base de fibras mono y multifilares.

El sistema de un conjunto de fibras multifilares unidas en un haz en la parte media y apartadas unas de otras en ambos extremos para poder lograr una vibración sincrónica y cofásica libre de sus extremos garantiza un alto volumen de información transmitida con alta resolución y alta calidad de la imagen. En estos sistemas es obligatoria la condición de que en el proceso del movimiento oscilatorio de todas las fibras se recubra y se interrogue toda el área de la imagen transmitida.

En el vibroendoscopio de un conjunto de fibras libres en los extremos la transimisión media de luz en el tiempo es menor que la transmisión de luz de las mismas fibras; además, este tipo de endoscopios se caracterizan por la complejidad de su construcción.

Los vibroendoscopios en forma de un haz de fibras de disposición compacta en los extremos, los cuales han sido examinados en el capítulo III, si sus extremos están sometidos a oscilaciones desordenadas cofásicas y sincrónicas con la amplitud del orden de 4 a 5 diámetros de filamentos y con la frecuencia obligatoriamente mayor que la perceptible por la vista humana, se caracterizan por un gran volumen de información transmitida, un alto poder resolutivo (el doble del valor nominal $R = (2D)^{-1}$, donde D es el paso de la estructura) y alta transmisión de luz. Sin embargo, la posibilidad de oscilación

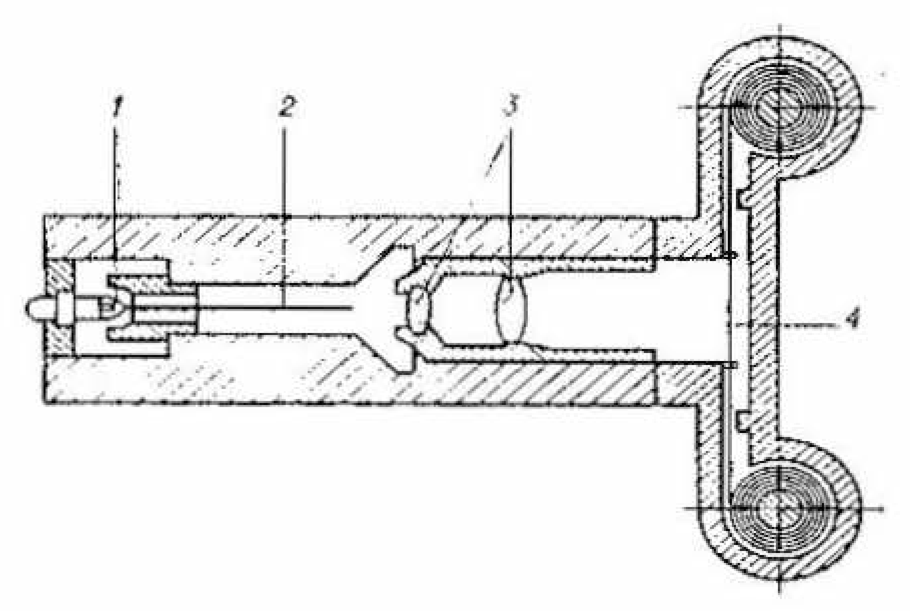


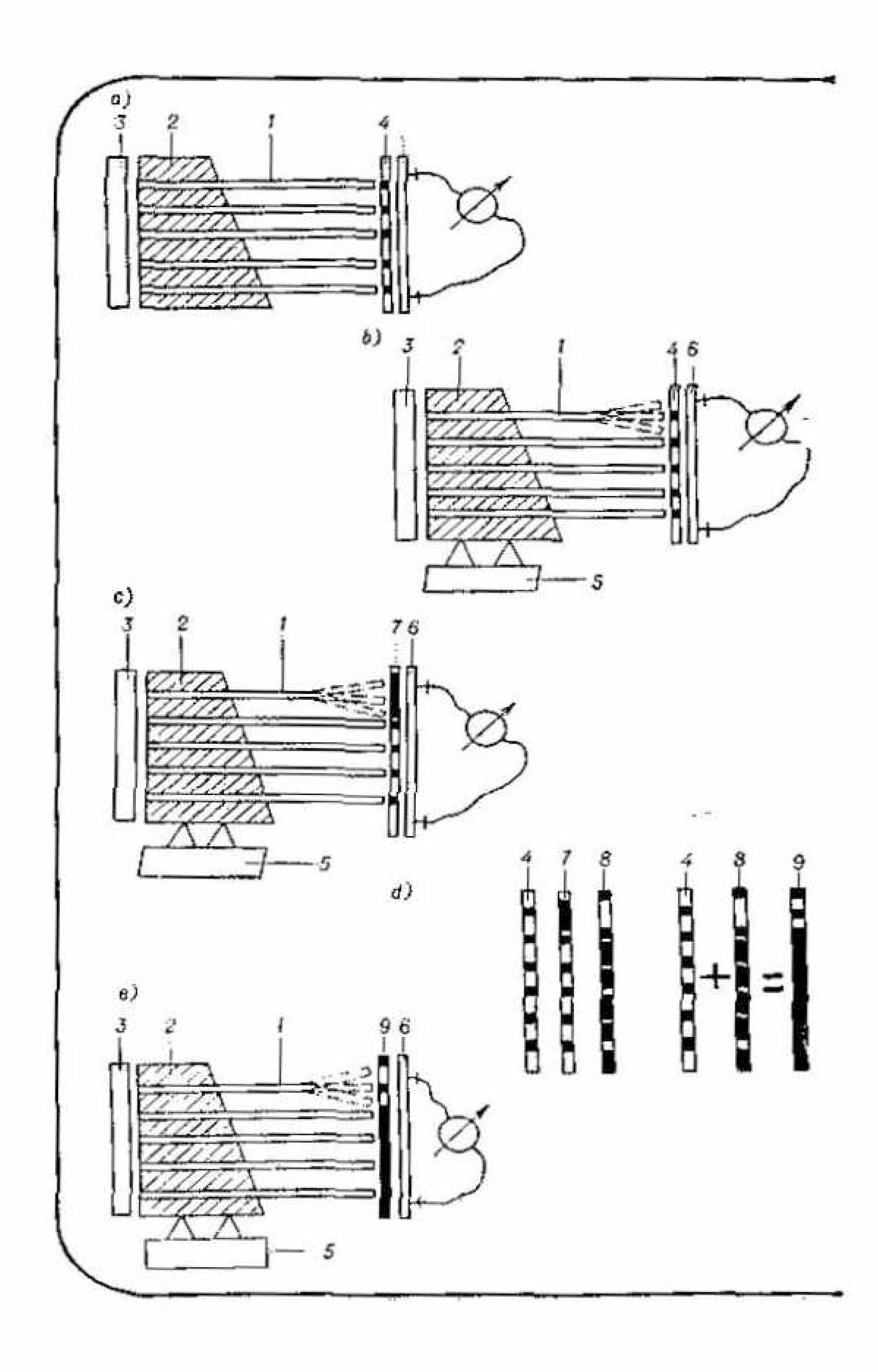
FIG. 111. Acelerómetro con fibra óptica

de los extremos de las mechas flexibles de fibras está limitada por la sección del haz, por la estabilidad de las fibras unitarias a las flexiones múltiples y por la complejidad de la construcción. Cuando estas limitaciones se hacen notorias se aplica el método de vibración de la imagen con respecto al haz de fibras.

Fibras fijas en soportes. Las fibras cuyos extremos pueden oscilar libremente bajo acciones externas son un ejemplo bastante difundido de la utilización de las fibras ópticas de la séptima clase. Veamos dos casos. El primero de ellos es el *acelerómetro* de fibras que es un dispositivo para la medición de la aceleración (fig. 111). El núcleo de este dispositivo lo constituye la fibra óptica *2*, cuyo extremo se sujeta rígidamente y forma un todo con el cuerpo del acelerómetro. El extremo fijo de la fibra se ilumina por la lámpara *1*; la luz al salir por el segundo extremo libre se proyecta por medio del objetivo *3* a la película fotográfica *4*. La fibra es puesta en oscilación por acción de las fuerzas externas. Según la trayectoria de la mancha luminosa obtenida

en la película después de revelarla, se puede considerar la dirección y magnitudes máximas de las aceleraciones accionantes. Si durante la investigación la película se desplaza con determinada velocidad, la fijación obtenida permite determinar la variación en el tiempo de las aceleraciones dirigidas por el eje perpendicular al sentido de desplazamiento de la película. Para aumentar la gama de aceleraciones registradas se pueden emplear varias fibras ópticas, dispuestas cerca en un mismo plano perpendicular a la dirección de desplazamiento de la película fotográfica. En este caso, las fibras se distinguen entre sí por el diámetro si están hechas del mismo par de vidrios. Para la medición de la amplitud de oscilaciones y aceleraciones en una dirección estudiada, los científicos soviéticos en 1965 utilizaron las fibras ópticas de forma asimétrica en una sección transversal, por ejemplo, rectangular. Esta fibra tiene una rigidez un poco menor en la dirección de la aceleración que en la dirección perpendicular.

En la actualidad, uno de los elementos de la séptima clase, más difundidos en la rama de construcción de aparatos, son los *septrones* o analizadores optoacústicos de fibras. El septrón está constituido por el haz de fibras ópticas *1* (fig. 112, *a*) un extremo de las cuales se encuentra rígidamente fijo en el soporte cuneiforme *2*. La diferencia de longitudes así obtenida, teniendo un diámetro igual para todas las fibras, asegura la diferencia entre las frecuencias propias de resonancia de ellas. Los extremos filos de las fibras son iluminados por la fuente *3*. Al conectar el alumbrador, la luz se transmite a través de las fibras e incide en la película *4*, en que tras de ser revelada aparecen los puntos oscuros frente a los extremos de salida de las fibras. Si se coloca esta película en la posición anterior, al iluminar de


a)
3
2
1
4
b)
3
2
1
4
6
5
c)
3
2
1
7
6
5
d)
4
7
8
4
8
9
e)
3
2
1
9
6
5

nuevo las fibras inmóviles en la fotocélula *6* no incide la luz. Si por medio del captador *5* (fig. 112, *b*) se transmite una señal sonora de determinada frecuencia, las fibras que tengan una frecuencia de resonancia propia igual empiezan a vibrar; la fotocélula indica la aparición de esta señal. Mas esta máscara *estática* sólo puede indicar la llegada de una señal de frecuencia correspondiente al conjunto de fibras del haz y no determina directamente esta frecuencia

Por medio de este mismo haz de fibras se construye la máscara *de obstrucción 7*, para lo cual a las fibras se aplica una señal de frecuencia conocida (fig. 112, *c*). Ya revelada y dispuesta en su lugar la mascara de obstrucción *7* da una mayor sensibilidad a todo el sistema en conjunto: si se sabe con seguridad que el septrón ha recibido una señal pero se encuentra «en silencio», esto significa que la señal recibida es igual a la señal grabada en la máscara de obstrucción. Pero la utilización práctica de los septrones «silenciosos» es incómoda. Por esto, empleando los métodos de fotoimpresión, se prepara la fotomáscara *básica 9* (fig. 112, *d*); se impresiona el positivo *8* de la máscara de obstrucción *7*. La combinación fotográfica *9* del negativo de la máscara estática y del positivo de la máscara de obstrucción (fig. 112, *e*) ya asegura una reacción activa del septrón: la fotocélula registra la llegada de la señal con la frecuencia dada y las demás frecuencias, o sea, la luz saliente de otras fibras, son bloqueadas por la máscara.

En la fig. 113 se representa un septrón multibloque: al llegar la información a este septrón programado para determinadas palabra, señal o frecuencia sonora el aparato, en el orden de

←——

FIG. 112. Septrón y esquema de recepción de una fotomáscara de memoria

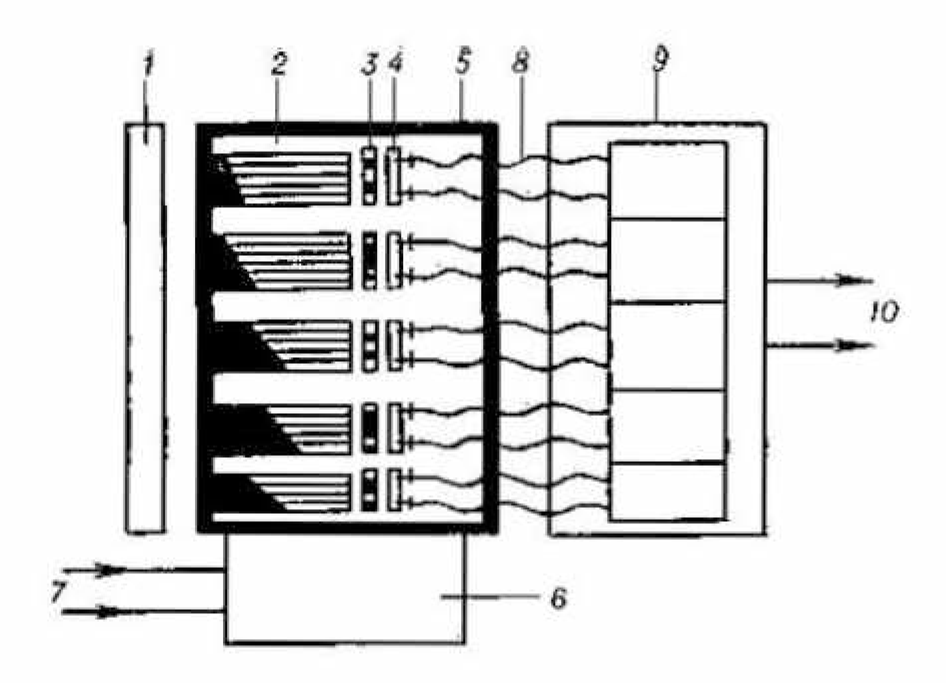


FIG. 113. Esquema de un analizador óptico-acústico de fibras (septrón):

1—alumbrador común; 2—bloque de múltiples septrones individuales; 3—fotomáscaras; 4—fotorreceptores; 5—funda común del analizador; 6—generador de sonido común; 7—entrada de la señal; 8—salida de los fotorreceptores; 9—bloque-esquema de selección de resolución; 10—salida de la señal descifrada

llegada de las señales sonoras, «indica» la aparición de éstas; el convertidor *9* graba la información recibida o da la orden *10* a los sistemas siguientes. Las dimensiones del bloque-septrón, cuyo esquema se indica en la fig. 113, son, en general, pequeñas, puesto que los diámetros de los filamentos aquí utilizados son de 5 a 200 μ y longitud de 5 a 100 mm. Aquí sólo se ha indicado un esquema simplificado de programación de los septrones. En la práctica, en la foto máscara básica *3* de cada bloque de fibras *2* se graba una señal sonora compleja, por ejemplo, una palabra; en este caso sólo varias fibras son activas. La metodología de la obtención de la máscara fotográfica básica no varía: se obtienen el negativo de la máscara estática, el positivo de la máscara de obstrucción para la señal compleja

Esquema 8

Octava clase — elementos de la óptica de capas

- De capas planas con capas conductoras de luz elementales
  - Rectas
    - De capas rectas
    - De capas torcidas
    - De capas cruciformes
  - Combadas
    - De capas curvas
    - De capas cruciformes
- De foclines con capas conductoras de luz elementales
  - Rectas
    - De capas cruciformes
    - De capas torcidas
  - Combadas
    - En un mismo plano
    - De capas cruciformes
- De capas radiales / De capas circulares
  - De capas rectas
  - De capas cónicas
  - De capas espirales
- De capas espirales
  - De capas rectas
  - De capas cónicas

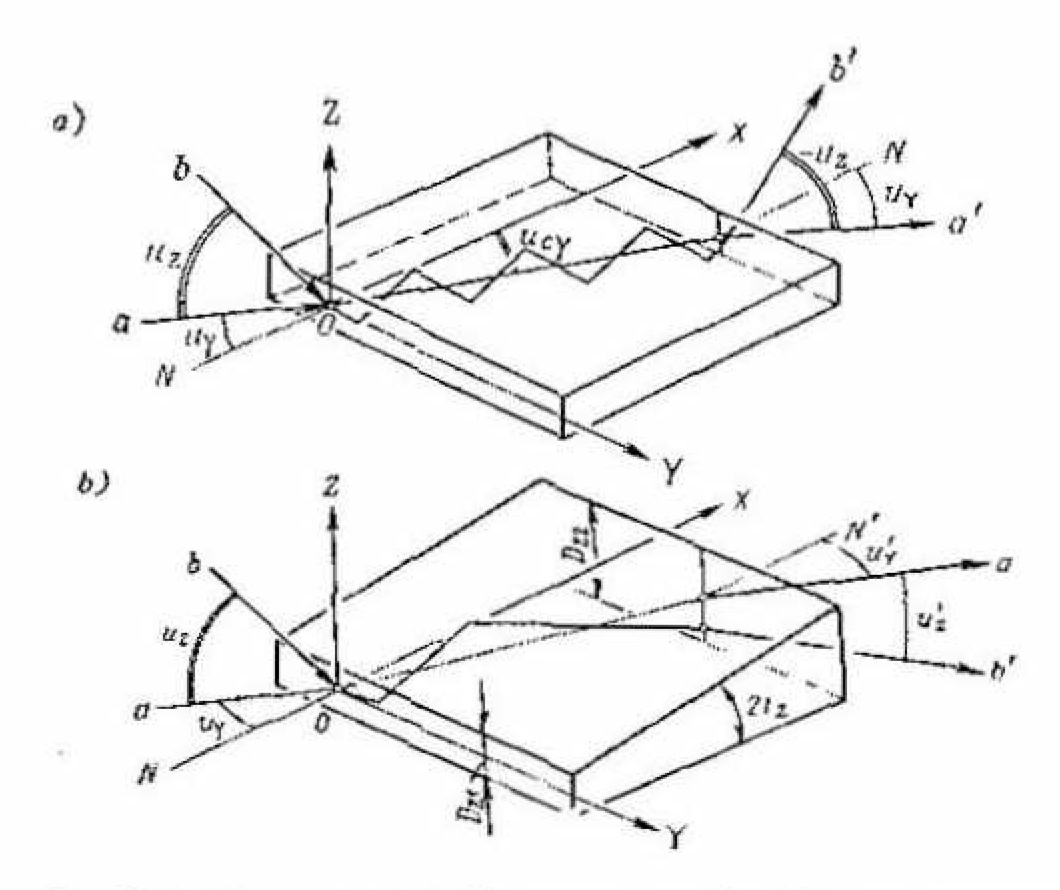


FIG. 114. Esquema de la propagación de un rayo en una capa conductora de luz: *a* — planoparalela; *b* — cuneiforme

dada y su fotocombinación para la máscara básica memorizadora.

El campo de utilización de los analizadores optoacústicos de fibras, es bastante amplio: la identificación de señales acústicas, de símbolos hablados, el control del estado de las máquinas a base del «ruido» propio de trabajo, el análisis de la voz del hombre, de animales, de delfines, la investigación del trabajo del corazón, el diagnóstico clínico y técnico y muchos otros aspectos.

Octava clase: óptica de capas. En la óptica de capas (esquema 8), la forma del filamento conductor de luz no tiene simetría axial. Debido a esto, la difusión de los rayos sujetos, obedeciendo las leyes de la óptica geométrica de los con-

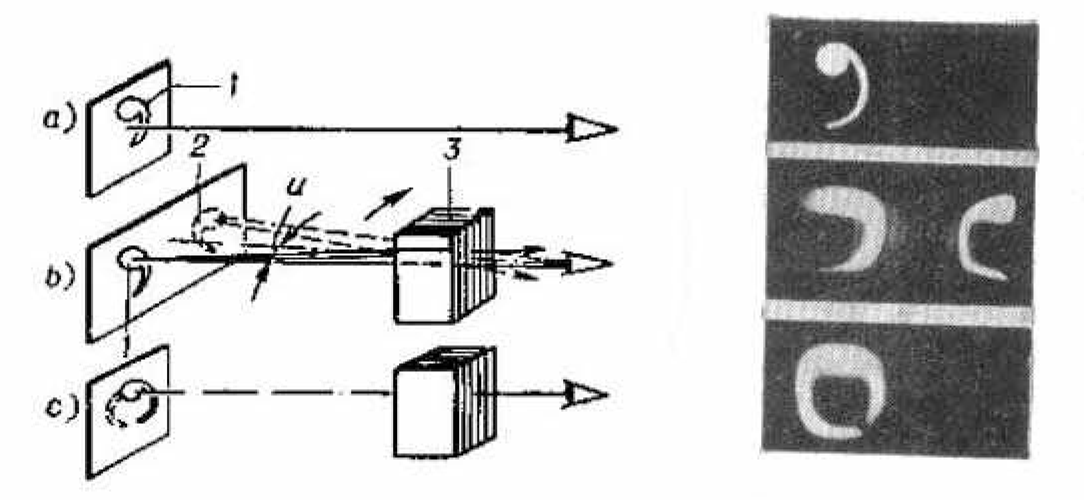
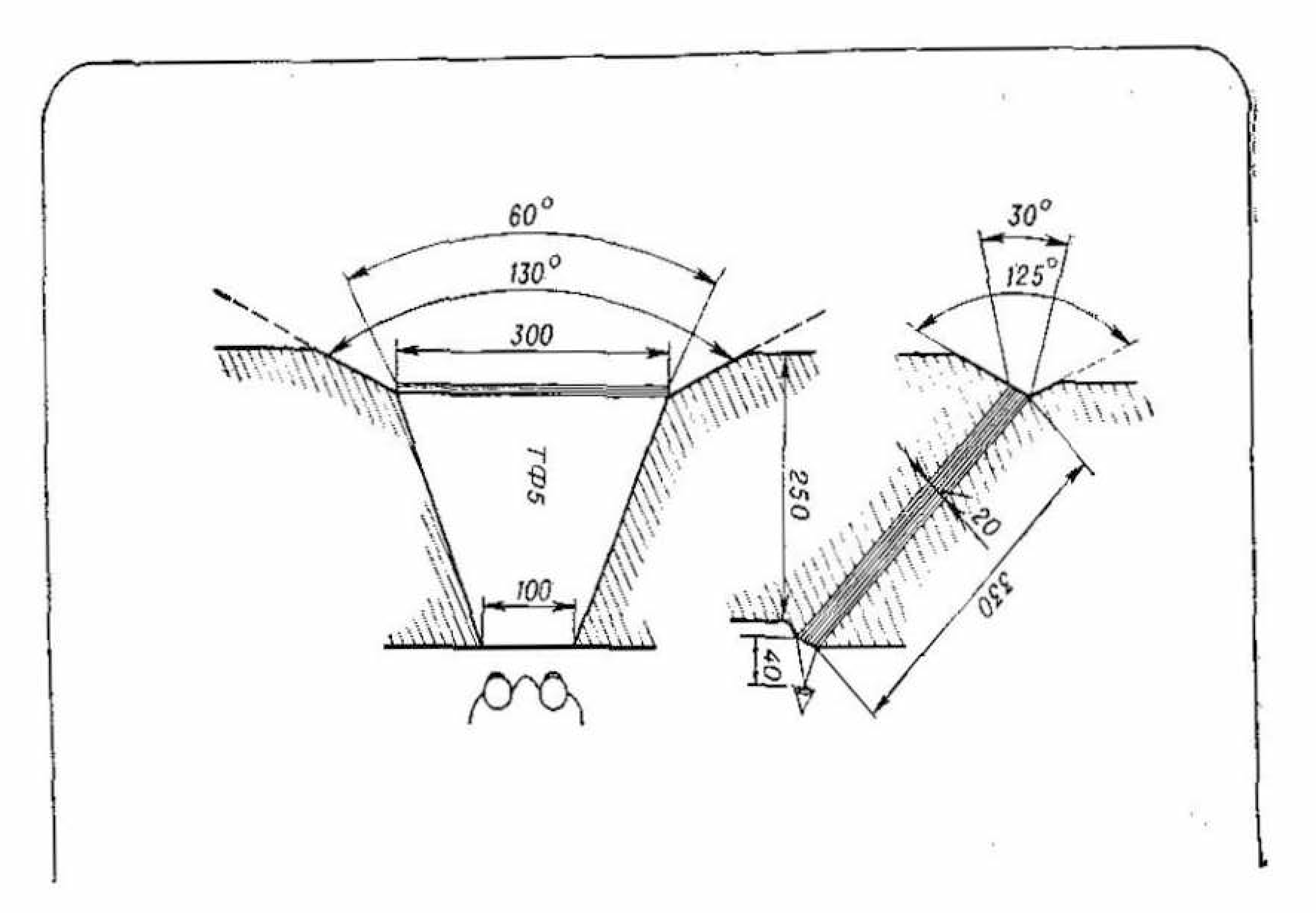


FIG. 115. Principio de funcionamiento del goniómetro en capas

ductos de luz, tiene su particularidad: las proyecciones del ángulo de inclinación del rayo a la salida de los conductos de luz en capas son diferentes en dos planos recíprocamente perpendiculares y además no aparece la mezcla de rayos en la salida. Esto se puede observar en la fig. 114 donde se indican los esquemas de difusión de los rayos a través de los conductos de luz planoparalelo y cuneiforme. Esta propiedad de los sistemas conductores de luz en capas permite formar la imagen de un objeto distante sin ayuda, a la entrada, de los elementos de la óptica corriente. En la salida el sistema óptico es obligatorio, por ejemplo, el ojo.

En la fig. 115 se muestra el principio de trabajo del *goniómetro en capas*. Al observar a través del elemento conductor de luz de capas planas *3*, consistente en una resma de vidrios planoparalelos luminosamente aislados, un objeto luminoso *1* (fig. 115, *a*) el que se observa en forma de dos imágenes *1* y *2* invertidas especularmente (fig. 115, *b*); con cierto giro de la resma se puede lograr la compatibilidad de algunas partes de las dos imágenes (fig. 115, *c*). A la derecha de la fig. 115 se muestran las fotografías de un objeto


60°
130°
300
ТФ5
100
30°
125°
250
20
330
40

y sus imágenes observadas a través del elemento conductor de luz en capas *3*.
En la fig. 116 se indica un sistema en capas para la observación a través de una ranura en la pared. Para las dimensiones como las indicadas en la fig. 116, a una distancia del ojo de 40 mm del extremo de salida del elemento, el campo visual es de 30 × 60°, y al desplazar la cabeza, 125 ×130°
En fig. 117 está representado el esquema de principio del *sistema de retrovision en capas*: la imagen que viene en el sentido *N* (*1*, *2*) se transmite a la dirección *N'* (1', *2'*). Este sistema puede ser compacto y ligero; por ejemplo, se puede fijar en calidad de visera en el casco de un motociclista.

Las investigaciones preliminares al respecto demuestran que por medio de sistemas conductores de luz en capas en una serie de casos se logran características cualitativas mejores de los sistemas ópticos en comparación con el uso de los elementos de la óptica común. La formación de la imagen por medio de elementos en capas de los conductos de luz se diferencia mucho de la formación de la imagen por medio de elementos de la óptica clásica. Los elementos en capas de los conductos de luz pueden actuar como sistemas ópticos independientes a la percepción de la imagen por el ojo humano o pueden formar parte de sistemas ópticos complejos que consisten además de aquellos, en los elementos de la óptica común y los elementos fibrosos de las otras nueve clases. La óptica de capas es una tendencia nueva y prometedora de la fibroóptica.

Novena clase: elementos fibrosos de formación autónoma de imagen. En el capítulo III se mostró que entre los sistemas de conductos de

←—

FIG. 116. Esquema de un sistema para la observación a través de una ranura en la pared

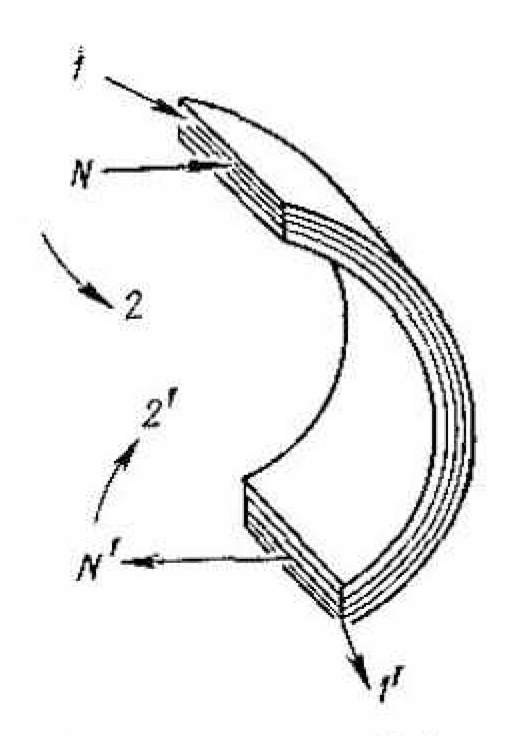
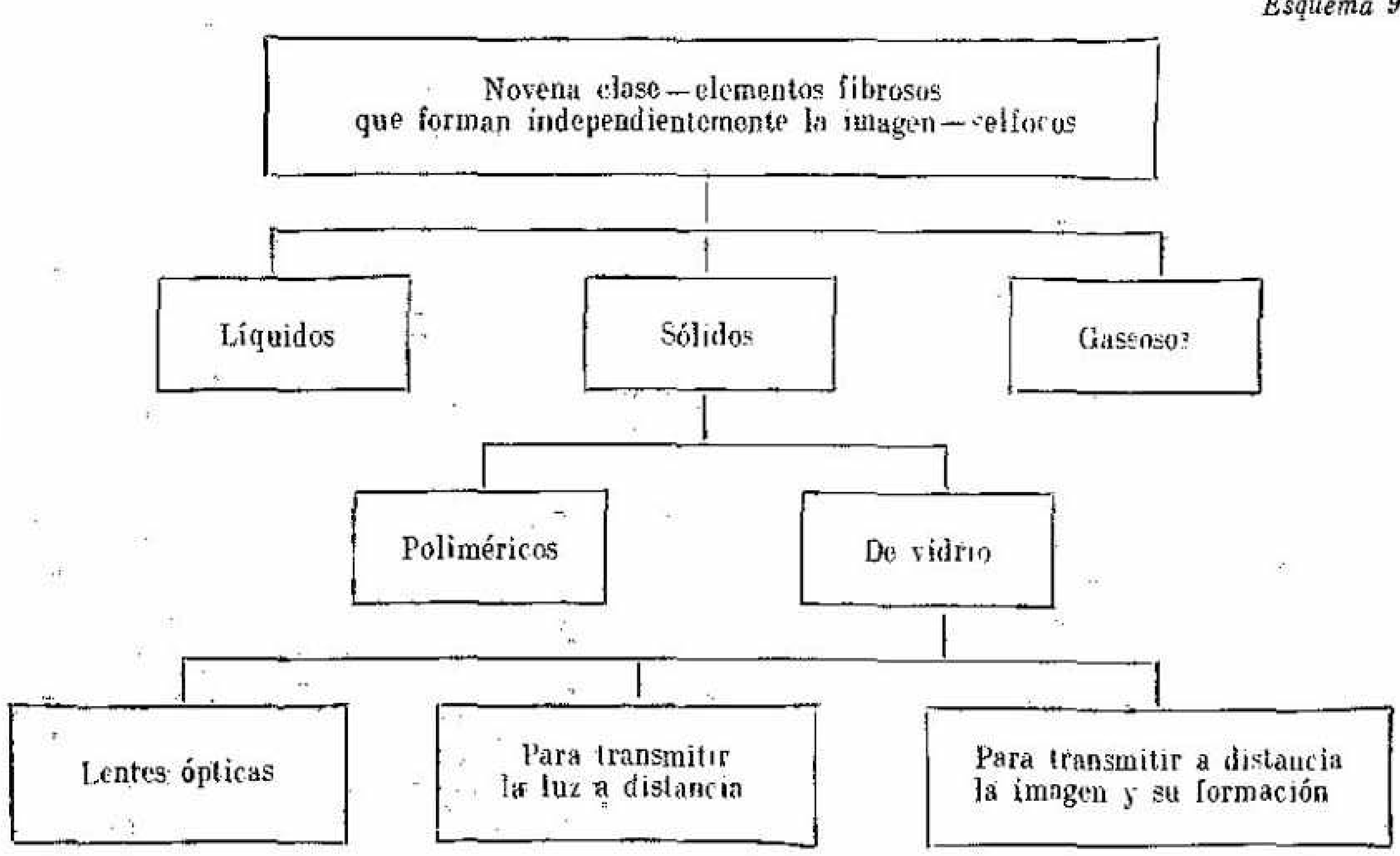


FIG. 117. Esquema de principio del sistema retrovisor en capas para conductores

luz de forma simétrica axial de los filamentos conductores de luz sólo un haz de fibras muy estrechado, o sea, el objetivo focón, posee la propiedad de formar en su extremo de salida la imagen de un objeto a distancia sin emplear en la entrada cualquier sistema óptico. Los sistemas de conductos de luz basados en filamentos conductores de luz axialmente asimétricos, es decir, la óptica de capas, están en capacidad de transmitir la imagen de un objeto alejado en forma individual (sin emplear en la entrada la óptica complementaria). Al efecto se cumple que en el extremo de salida del elemento de capas, a diferencia del objetivo focón, la distribución de la iluminación no es un análogo del objeto, o sea, no hay semejanza desde el punto de vista óptico. La imagen se forma por el sistema óptico en un plano incompatible con el extremo de salida del elemento conductor de luz en capas. En calidad de este sistema óptico se puede considerar el ojo

Esquema 9



Novena clase — elementos fibrosos que forman independientemente la imagen — selfocos
Líquidos
Sólidos
Gaseosos
Poliméricos
De vidrio
Lentes ópticas
Para transmitir la luz a distancia
Para transmitir a distancia la imagen y su formación

FIG. 118. Propagación de la luz en un selfoco y en un conducto de luz común de dos capas

—→

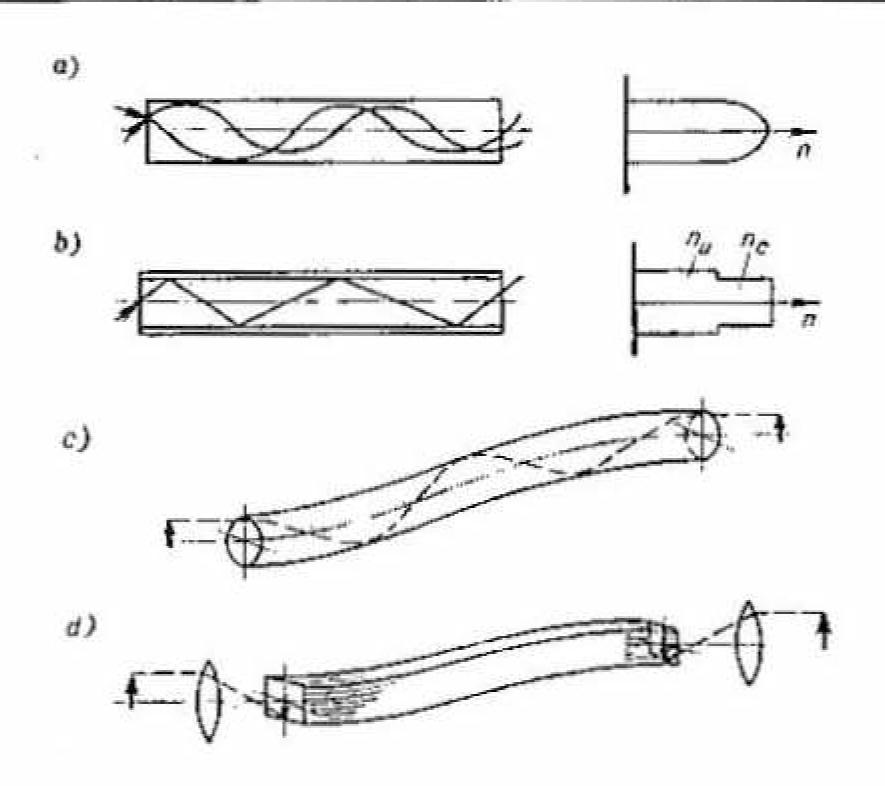
humano cuyo objetivo cristalino forma la imagen en la superficie de la retina.

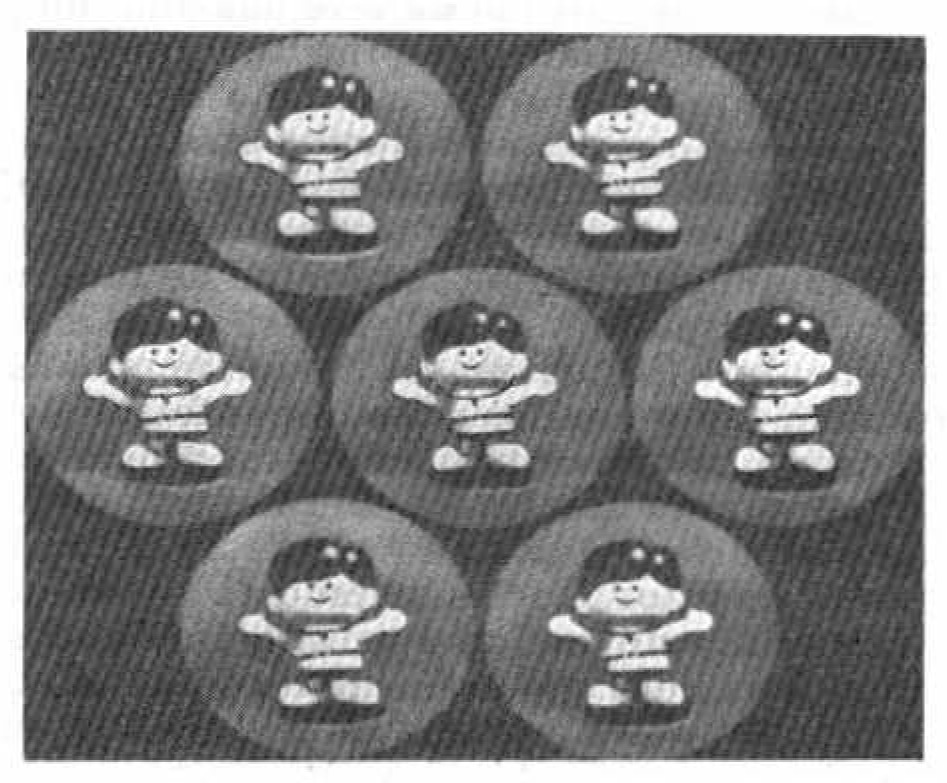
En los últimos 5 ó 6 años se ha creado una clase especial (esquema 9) de conductos de luz de forma simétrica axial de la sección, los denominados selfocos, los cuales pueden formar individualmente la imagen del objeto en el extremo de salida formado en el extremo de entrada. Los *selfocos* constan de los conductos de luz monofilares sin recubrimientos de sección transversal generalmente circular y con simetría axial y cuyo índice de refracción variable en la sección. Si el índice de refracción disminuye desde el eje hasta el extremo en forma parabólica (por ejemplo, $n = n_c (1 - 0{,}5\, ar^2)$, donde n_c es el índice de refracción en el eje y n, el índice de refracción a una distancia r del eje), la difusión de los rayos no ocurre en trayectoria rectilínea quebrada (fig. 118, *b*) con reflexión en la frontera filamento — recubrimiento como en los conductos de luz comunes con recubrimiento aislador, sino se difunde en curva sinusoidal (fig. 118, *a*). Debido a la variación (disminución) del índice de refracción en la sección los selfocos tienen la propiedad de dar un enfoque luminoso: el haz de rayos dirigido a la parte periférica del conducto de luz siempre se va a desviar en la dirección al eje.

Con tal carácter de disminución del índice de refracción desde el eje hacia el extremo, utilizando determinadas relaciones entre la longitud y el diámetro del selfoco, éste cumple las propiedades de las lentes ópticas y de esta manera

—→

FIG. 119. Microfotografía de la cara de entrada de un haz de selfocos


a)
n
b)
n_u
n_c
n
c)
d)



forma la imagen en el extremo de salida: los rayos de un punto dado del extremo de entrada se reúnen en un punto del extremo de salida, conjugado con el primero. Como esto se cumple para todos los puntos del extremo de entrada del selfoco la imagen formada en este extremo se transmite al extremo de salida formándose aquí mismo. En la fig. 119 se muestra una fotografía del extremo de salida de un haz de selfocos a la entrada de los cuales fue proyectada la imagen de un mismo objeto.

De esta forma, si para la transmisión de la imagen por medio de los conductos de luz comunes es necesario tener un haz de fibras unitarias dispuestas regularmente, el mismo selfoco unitario transmite la imagen (fig. 118, *c*, *d*). Los haces regulares flexibles o rígidos de selfocos se convierten de esta forma en elementos optofibrosos de grandes posibilidades, puesto que al proyectar al extremo de entrada de este haz una imagen, el elemento resolutivo no es limitado por el diámetro del filamento, sino es mucho menor; cada uno de los filamentos selfocos transmite más detalladamente la información-imagen del objeto inicial.

La luz que sale de los conductos de luz comunes resulta dispersada debido a la difracción en la salida de las fibras; en el flujo de salida se encuentran rayos con los más diferentes planos de polarización y las atenuaciones, con grandes desfasajes debido al número tan distinto de reflejos que soportan diferentes rayos al difundirse por un filamento. En los selfocos la atenuación de todos los rayos es igual y, además, no hacen variar la fase del flujo transmitido. Las cualidades indicadas de los selfocos les han dado grandes perspectivas para la técnica de láseres.

Los láseres comunes de fibras (fig. 108) gracias a una superficie exterior extensa han mejora-

do esencialmente el problema de refrigeración del láser de conducción de luz excitado (que por esto mismo se recalienta), sin embargo, a la salida del láser común de fibras la radiación se dispersa debido a la difracción de los rayos en el extremo de salida de la fibra. Los láseres de selfocos en los cuales los iones de neodimio se encuentran uniformemente distribuidos en la sección y el índice de refracción disminuye parabólicamente hacia el extremo periférico, no dispersan el rayo láser saliente sino al contrario, lo enfocan. Además, los láseres no hacen variar la amplitud ni la fase de los rayos salientes.

Para longitudes iguales del eje y diámetros seccionales, la longitud media de recorrido de los rayos en los selfocos es menor que en los conductos de luz comunes. La difusión de la luz en una trayectoria sinusoidal continua provoca un fenómeno como si no existieran reflexiones, o sea, que no existen pérdidas en las reflexiones múltiples en el límite de separación filamento — recubrimiento. Estas dos últimas peculiaridades de difusión de la luz a través de los selfocos hacen que para iguales longitudes de ellos la transmisión de luz sea mayor que en los conductos de luz comunes.

En la actualidad son ampliamente conocidos diferentes métodos de obtención de los selfocos. En 1965, los científicos soviéticos fueron los primeros en idear un método de obtención de los conductos de luz a partir de un vidrio de una misma composición por medio de un tratamiento químico de la superficie lateral de las fibras logrando de esta forma la disminución del índice de refracción desde el eje hacia el extremo del conducto de luz. La comprobación experimental ha demostrado la efectividad de este método. En la actualidad se emplea ampliamente el método denominado de intercambio iónico para la obten-

ción de selfocos y se fundamenta en lo siguiente: mediante el correspondiente tratamiento químico de los conductos de luz sin recubrimiento, por su superficie lateral se logra el intercambio de iones, o sea, se le quitan unos y en su lugar son introducidos otros. Debido a que la actividad del método disminuye con la profundidad del material, esto da lugar a una disminución del índice de refracción desde el eje hacia el extremo por selección de los respectivos vidrios, las sustancias químicas activas y eligiendo el régimen de tratamiento de las fibras.

Los selfocos son elementos de la fibroóptica que tienen grandes posibilidades en los diferentes ramas de la fabricación de instrumentos. En una serie de aparatos sustituyen efectivamente a los conductos de luz comunes. Los selfocos pueden funcionar en conexiones en serie con los haces comunes de conducto de luz, desempeñando en este caso el papel de microobjetivos de alta resolución con una gran profundidad de enfoque. En la actualidad ya se han diseñado selfocos de estructura compleja: curvos, de sección variable a lo largo de la longitud (focones para la inversión de la imagen). Ahora el campo de utilización de los selfocos es amplio: para las líneas de comunicación óptica a larga distancia, los elementos ópticos microenfocadores, la microelectrónica óptica, los esquemas integrales ópticos en miniatura, los endoscopios técnicos y medicinales, la técnica láser y otros más.

Décima clase: guías de ondas. Durante el estudio de los elementos fibrosos de las nueve clases anteriores nos hemos basado totalmente en las leyes de la óptica geométrica, en particular, en la trayectoria rectilínea de los rayos en un medio con índice de refracción constante. Esta consideración es justa siempre y cuando el diámetro del filamento conductor de luz sea supe-

rior varias veces a la longitud de onda λ de la radiación transmitida y, además, que el grosor de la capa aisladora entre dos filamentos no sea menor de 1,5 a 2 λ. Al ocurrir una reflexión interna total la onda luminosa entra en el segundo medio a muy pequeña profundidad (del orden de la longitud de onda) retornando totalmente al primer medio si el segundo medio es lo suficientemente grande. Cuando el diámetro del filamento llega a ser conmensurable con la longitud de onda de la luz transmitida por aquél, empiezan a actuar y dominar las propiedades ondulatorias de la luz. Por ejemplo, si el diámetro del filamento es igual o menor y el espesor del recubrimiento es varias decenas de veces mayor que la longitud de onda luminosa, ocurre que la energía de la luz se difunde, en general, en el material del recubrimiento. Este tipo de fibras realizan las funciones de guías de ondas (esquema 10). Por regla general, el material del recubrimiento en las fibras de vidrio es mucho más transparente que el material del filamento, y como en las guías de onda la energía luminosa se difunde generalmente en el material de los recubrimientos, entonces las pérdidas de absorción en las guías de ondas es menor que en los conductos de luz.

Al disminuir el diámetro del filamento y al adelgazar bastante o simplemente eliminarse el recubrimiento, parte de la energía luminosa sale de los límites de la fibra, difundiéndose a lo largo de ésta gracias a la «interconexión» entre estas dos. Al disminuir notablemente el diámetro de la fibra, más y más cantidad de energía luminosa sale de la fibra y se difunde en el aire, prácticamente sin absorberse, puesto que la absorción luminosa del aire es incomparablemente menor que la absorción de la luz por el vidrio u otro material cualquiera; la transmisión

Esquema 10

- Décima clase — guías de onda
  - Metálicas
    - Conductor unitario
    - Par de conductores
    - Tubo hueco
  - Dieléctricas
    - Sin envoltura aisladora de luz
      - Redondos
      - Tubulares
      - Laminosos
      - Dobles
      - Elípticos
      - Rectangulares
    - Con envoltura aisladora de luz
      - Redondos
        - Unitarias de vidrio
        - Par de fibras de vidrio
          - No correlativas
          - Correlativas ópticamente
        - Haz de fibras de vidrio
          - No correlativas
          - Correlativas ópticamente
      - Tubulares
      - Laminosos
      - Elípticos
      - Rectangulares
      - En forma 0
  - Metalodieléctricas
    - Combinación de placas dieléctricas y metálicas paralelas
    - Conductor metálico con revestimiento dieléctrico
    - Líneas dieléctricas reflectoras
    - En II
    - En V
    - En U

energética de luz de las guías de ondas aumenta más si del espacio interfibroso se saca el aire. En este caso cada fibra queda como un riel por el cual se conduce el flujo luminoso. Gracias a la alta transmisión energética las fibras superfinas (guías de ondas) permiten transmitir a una distancia de varios cientos de metros e incluso a varias decenas de kilómetros señales luminosas portadoras de información codificada; la señal luminosa atenuada se amplifica por un retransmisor láser y se transmite hacia adelante por la fibra siguiente. Las guías de ondas de vidrio han resultado tener grandes posibilidades como elementos para las líneas ópticas de comunicación a larga distancia en lugar de los cables telefónicos y guías de radiondas. En los cables de guías de ondas de vidrio de todo el conjunto de fibras unitarias, cada una de ellas representa un canal informativo que transmite una información varias miles de veces mayor que un par de cables comunes de teléfono, y varias veces más información que por los medios actualmente empleados para la retransmisión de programas de televisión.

La creación de las guías de ondas fibrovidriosas, además del valor puramente aplicable tiene un gran valor científico. La radiación se difunde a lo largo de las guías de ondas de fibras como las radiondas ultracortas por las guías de radiondas. Estas últimas consisten en tubos metálicos huecos (recuérdense los conductos de ondas de V. N. Chikoliev) y en cables coaxiales, los mismos que, por ejemplo, van desde las antenas de televisión hasta los televisores. La luz y las radiondas son formas de las ondas electromagnéticas. Los procesos complejos de difusión de radiondas en las guías de radiondas hasta ahora son solamente descritos por complejas fórmulas.

Las guías de ondas fibrovidriosas han permitido ver con sus propios ojos diferentes tipos de

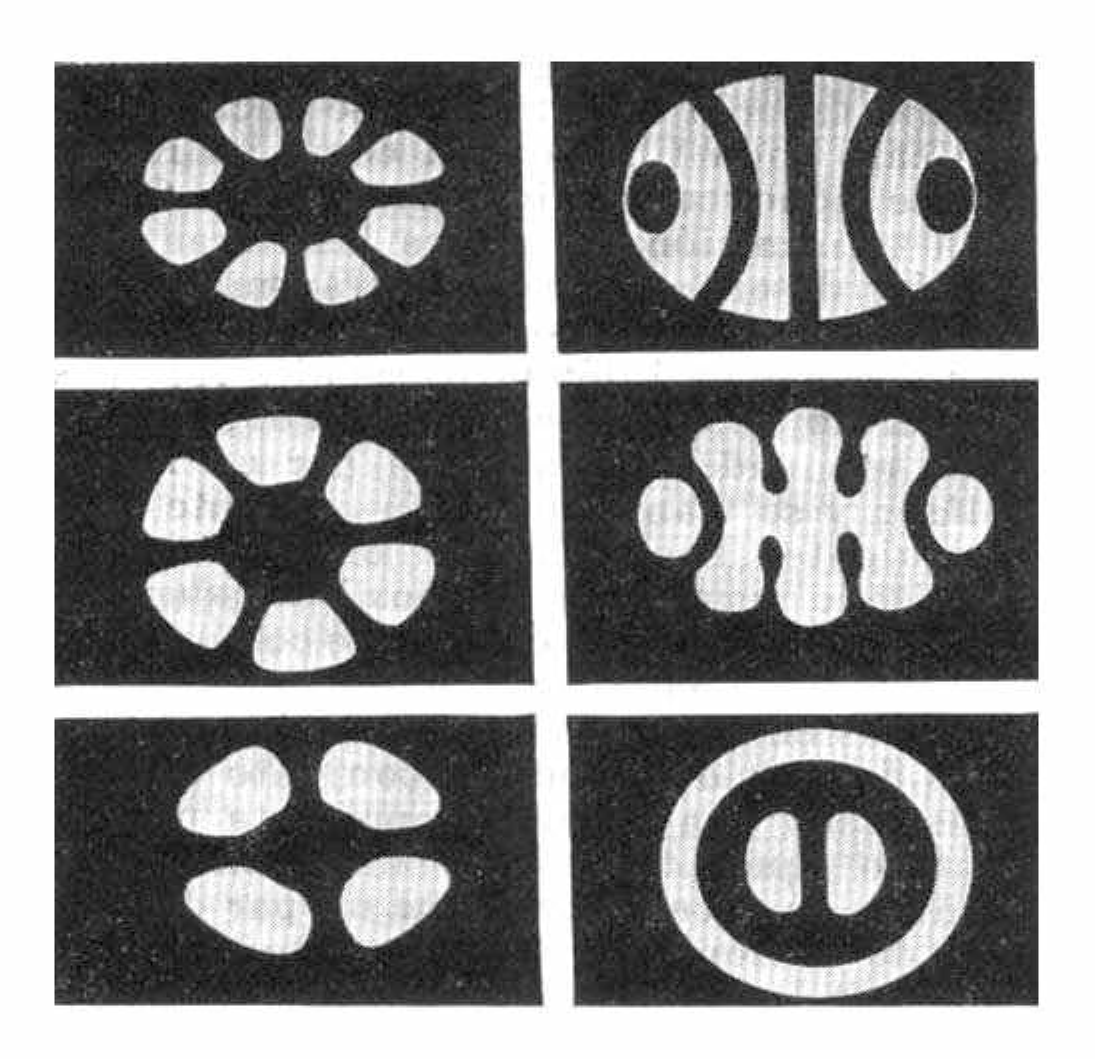


FIG. 120. Microfotografía de varios tipos de ondas que se observan en las caras de salida de una guía de ondas de vidrio

ondas y, por lo tanto, han permitido comprender más profundamente el mecanismo de difusión de las ondas electromagnéticas a través de las guías de radiondas. Al observar el extremo de salida de las guías de ondas de fibras en el otro extremo de las cuales incide la luz blanca, se puede ver una imagen a colores que da una idea del carácter tan complejo de la reflexión interna total en las guías de ondas y, en particular, demuestra que a través de las guías de ondas se pueden difundir sólo las ondas luminosas de determinada longitud.

A diferencia de los conductos de luz, en lugar de la iluminación uniforme observable en los extremos de salida, se ven manchas oscuras y claras alternas dispuestas simétricamente, diferentes por su forma y color en las distintas fibras (fig. 120). La irregularidad de la iluminación de los extremos de salida de las fibras se explica por las siguientes causas. A una aproximación del diámetro de las fibras y de la longitud de onda luminosa, la reflexión interna total no aparece para ángulos de incidencia de la luz mayores que el ángulo crítico, sino solamente para algunos valores *discretos* de éstos, denominados característicos. A cada uno de estos valores corresponden su propia forma de difusión de la onda luminosa en la fibra, su propio tipo de ondas, su distribución de la energía en la onda luminosa y su intensidad, así como, determinada imagen a colores en la salida. Con el aumento del diámetro de la fibra se aumenta el número de tipos de ondas difundibles en la fibra dada. Si la fibra es lo suficientemente gruesa se obtiene para las diferentes ondas luminosas un conjunto *continuo* de ángulos característicos, las diferentes distribuciones de la energía luminosa para cada uno de ellos se superponen entre sí y la distribución total de la luz en el extremo de salida resulta uniforme, es decir, teniendo una guía de ondas y aumentando su diámetro (o la relación entre diámetro y la longitud de onda) se puede llegar al conducto de luz.

MÉTODOS DE LA TÉCNICA ÓPTICA CLÁSICA Y LA FIBROÓPTICA

5

Los principios básicos de difusión de la luz y transferencia de la imagen por medio de elementos de fibras han sido suficientemente bien estudiados hasta el momento, y de por sí los artículos fibrosos se utilizan ampliamente en la fabricación de aparatos. Sin embargo, hasta ahora no hay una confrontación de métodos entre la óptica clásica y la optotecnia de fibras y no están definidas las condiciones límites en las cuales los elementos fibrosos pueden dar técnicamente una solución más perfecta de los problemas que los elementos de la óptica clásica.

15. CONFRONTACION ENTRE LA TECNICA OPTICA CLASICA Y LOS SISTEMAS DE CONDUCTOS DE LUZ

La comparación de las características y propiedades básicas de los sistemas ópticos clásicos y los elementos de la fibroóptica viene dada en la tabla 7.

Luminosidad y transmisión de la luz. Los elementos fibrosos tienen una abertura numérica entre 0,01 y 1 y considerablemente superior, es decir, superan esencialmente en luminosidad (capacidad de condensación luminosa) a los sistemas ópticos comunes. Esta ventaja de los elementos conductores de luz se logra no en función de la complejidad de la construcción del sistema, como en la óptica clásica, sino a base de la elección respectiva del par de vidrios. Esta ventaja de los elementos fibrosos da lugar a una amplia utilización actualmente (y con aún más perspectivas en un futuro no muy lejano) en la fabricación de instrumentos mecano-ópticos y electrono-ópticos.

Sin embargo, los elementos fibrosos tienen con respecto a los sistemas clásicos una más alta luminosidad, pero no la transmisión de luz *en el caso general*. No se puede olvidar que si la longitud del conducto de luz es de 1 m, esto implica que el grosor del vidrio en el camino del rayo de luz no es menor de 1 m y que en este trayecto el rayo de luz se atenúa constantemente debido a la absorción en el vidrio. Además, en los sistemas ópticos, cualquier rayo que haya incidido en la entrada limitada por su abertura llega hasta el plano de la imagen. Y en un haz de conductos de luz los rayos que inciden en los extremos de entrada de las intercalaciones luminosas asiladoras son rayos parásitos, los cuales disminuyen el contraste de la imagen y son atenuados

por varios métodos. El recubrimiento con sustancias no metálicas de las caras del haz de conductos de luz en la mayoría de los casos no da los resultados deseados.

Desde el punto de vista de la transmisión de luz como una característica *energética* del sistema los elementos fibrosos tienen la ventaja sobre los sistemas ópticos de que en el haz de conductos de luz existen solamente dos superficies reflectoras de Fresnel: el extremo de entrada y el de salida. En un sistema óptico clásico compuesto de un número no muy grande de lentes, prismas, espejos, la cantidad de superficies reflectoras de Fresnel es mayor; sin embargo, gracias a un recorrido menor de los rayos a través del vidrio, como medio absorbente, la atenuación total de la luz es menor que durante la difusión de la radiación a través de un haz de conductos de luz. De esta manera, la transmisión de luz total en los sistemas ópticos de un pequeño número de lentes, prismas, espejos es mayor que la transmisión de luz por los elementos fibrosos. A una misma longitud axial de los sistemas ópticos y fibrosos en los sistemas ópticos de múltiples componentes (o sea, de gran número de lentes, prismas, espejos) la longitud de recorrido de los rayos en el vidrio es menor que en el haz de conductos de luz, pero el número de superficies reflectoras de Fresnel es muy grande. Por ejemplo, en los endoscopios flexibles para medicina a base de elementos de la óptica corriente el número de superficies refractarias llega hasta 80—90. Esto conlleva a una fuerte atenuación total de la luz debido a las reflexiones de Fresnel. La transmisión de luz de este tipo de sistemas ópticos es menor que en los elementos fibrosos (tabla 7).

Transmisión de radiación. Cuando hay necesidad de transmitir la radiación a distancia, por

ejemplo, para la iluminación de cavidades de difícil acceso o en calidad de señal patrón, es muy acertada la utilización de elementos fibrosos. En este caso se puede elevar la intensidad luminosa de la fuente, o sea el extremo de salida del haz de fibras, cientos veces en comparación con la intensidad luminosa de la lámpara dispuesta en esta cavidad.

Los elementos luminotécnicos fibrosos en comparación con los sistemas de iluminación comunes presentan una serie de ventajas: pequeñas dimensiones y peso, la forma compacta y flexible del conducto de luz, la posibilidad de obtener prácticamente cualquier forma de la fuente de iluminación, o sea, el extremo de salida del elemento fibroso. Además de esto, los alumbradores de fibras irradian a la salida, luz fría, es decir, luz en un intervalo de longitudes de onda entre 0,4 y 0,8 μ, gracias a la absorción de los rayos infrarrojos y ultravioletas. Esto constituye una gran ventaja para su utilización en los instrumentos para medicina, ya que a diferencia de los alumbradores eléctricos no dan la sensación de quemadura.

Transmisión de la imagen. Los sistemas ópticos transmiten la imagen de un objeto alejado y lo forman fuera de ellos en una superficie alejada notablemente del sistema. Esta cualidad de formación independiente de un objeto distante no es propia de los elementos fibrosos. La única excepción la constituye el objetivo focón; sin embargo, en primer lugar, éste a la salida forma la imagen sólo en su extremo de salida y, en segundo lugar, hay que reconocer que los sistemas ópticos clásicos resuelven más elegantemente este problema. Los conductos de luz de autoenfoque, o sea los selfocos (novena clase), tampoco forman la imagen de un objeto alejado, éstos solamente transmiten y forman la imagen que

Tabla 7

Comparación de los sistemas ópticos clásicos y elementos de fibroóptica

Denominación	Criterios de la comparación	Sistemas ópticos clásicos	Elementos fibroópticos
	Liminosidad A_0^2	$0 \leqslant A_0^2 \leqslant 1$	$0 \leqslant A_0^2 > 1$
Características energéticas	Transmisión de luz τ	τ de los sistemas ópticos de pocos componentes es mayor que la de los elementos fibroópticos τ de los sistemas ópticos multicomponentes es menor que la de los elementos fibroópticos	
	Formación de la imagen	Es propio a todos los sistemas	Es propio solamente del objetivo focónico y de selfocos
	Estructura de la imagen	Sin estructura	Mosaico
	Pérdidas en la información transformada	Insignificantes	Grandes
	Ruidos microestructural y macroestructural	Prácticamente están ausentes por completo	Son propias (microestructural— durante la formación de la imagen por exploración,

Transmisión de la imagen			macroestructural — en principio se puede eliminar)
	Ventana de luz que forma el elemento unitario de la imagen	Todo el diafragma de apertura	Filamento guía de luz unitario (2-10 μ de diámetro)
	Fraccionamiento y división física de la imagen en microelementos de algunos micrones de diámetro	Imposible realizar	Tienen lugar siempre
	Transformación de la información (codificación y descodificación)	Imposible realizar	Prácticamente cualquiera transformación de la información luminosa se realiza de un modo compacto y relativamente fácil
Característica frecuencia-contraste	El poder resolutivo R	Alcanza varios centenares de *líneas/mm*	Alcanza varias decenas de *líneas/mm*
	Factores que limitan R	En general el círculo de difracción de la dispersión	El diámetro de los filamentos y el espesor de la envoltura aisladora de luz

Denominación	Criterios de la comparación		Sistemas ópticos clásicos	Elementos fibroópticos
	Dependencia entre R y la longitud de onda λ de radiación		Aumenta con la disminuación de λ	Para el elemento dado no depende de λ
	Uniformidad do R por el campo		Disminuye en el borde de la imagen	Ingual por todo el campo siendo acceso normal de los filamentos a ambas caras
Característica frecuencia-contraste	Coeficiente de transformación del contraste	Para la frecuencia de los trazos $v \to 0$	$K \to 1$; cuando $v = 0$ $K = 1$	Cuando $v = 0$ $K < 1$ (el microcontraste propio es menor que 1)
		Cuando la frecuencia resolutiva R es máxima	$K \to 0$	$K > 0$ (R se determina por el paso de la estructura)

	Uniformidad en el campo	Disminuye en el borde del campo de la imagen	Igual en todo el campo siendo el acceso normal de los filamentos a ambas caras
Pupila de salida		Prácticamente no se difumina	Se difumina debido a diferentes causas (en particular, debido a la difracción de la luz a la entrada y la salida de cada filamento)
Reglaje de los sistemas		Es complicado debido a muchos componentes a lo largo del paso del rayo	Es simple gracias a la existencia sólo de dos superficies de trabajo (de cara) con respecto a las cuales es necesario realizar el reglaje de los sistemas de entrada y de salida

Continuación de la tabla 7

Denominación	Criterios de la comparación	Sistemas ópticos clásicos	Elementos fibroópticos
Flexibilidad del canal que transmite la información		Está limitada y es inferior a la flexibilidad de las trenzas de fibras	Está limitada para el material guías de luz dado por la flexibilidad de la fibra unitaria libre y por las propiedades constructivas de la trenza
Dimensiones de los transformadores de las transformaciones iguales de la información		Los convertidores ópticos son considerablemente mayores que los transformadores de fibras	
Peso P del sistema	Al transmitir la luz y la imagen sin transformación	P de los sistemas ópticos es menor que de los sistemas fibrosos	
	En caso de transformaciones de la información iguales	P de los convertidores ópticos es considerablemente mayor que de los transformadores fibrosos	

ha sido proyectada al extremo de entrada en su extremo de salida. De esta manera, sin tener en cuenta el caso particular del objetivo focón y los selfocos, los elementos fibrosos se distinguen en principio de los elementos de la óptica clásica por la incapacidad de formar la imagen (en este caso no estamos considerando los elementos de la óptica de capas de conductos de luz, es decir, la octava clase).

Como se señaló anteriormente, los elementos de fibras debido a su estructura mosaica dividen una imagen, proyectada al extremo de entrada, en elementos y realizan una transmisión de cada elemento de la imagen al extremo de salida. Si recordamos que el diámetro de los filamentos conductores de luz de los elementos fibrosos es igual a varias micras, es correcta la siguiente afirmación: la imagen transmitida y formada por los sistemas ópticos clásicos no posee completamente estructura y mosaica. Desde este pundo de vista los sistemas clásicos son indiscutiblemente más perfectos; la gran desventaja de los haces de conductos de luz radica en que la imagen transmitida es mosaica. La estructura discreta del haz de conductos de luz sirve como fuente de pérdidas de información que en los elementos fibrosos superan varias veces las pérdidas en los sistemas ópticos comunes.

Los aparatos de fibras se caracterizan por tener ruidos micro y macroestructurales; además, el nivel del ruido en comparación con los sistemas ópticos comunes es tan alto que tiene sentido la siguiente afirmación: los sistemas ópticos clásicos poseen un nivel nulo de ruidos. Esta ventaja y cualidad de los sistemas ópticos comunes son más comprensibles y notables si recordamos que en los sistemas ópticos clásicos «la ventana luminosa» que forma un elemento dado de la imagen, lo constituye todo el campo del sistema, por

ejemplo, todo el diámetro de la lente o del espejo. En las piezas fibrosas, cada elemento de la imagen se transmite y forma en el extremo de salida del haz de conductos de luz *solamente* por su ventana luminosa constituida por el filamento unitario de guía de luz. Esto no solamente es una diferencia *de principio* de los sistemas de fibras sino además es la base de exigencias al mejoramiento tecnológico de fabricación de elementos fibrosos y la calidad de los vidrios iniciales, puesto que un filamento parcialmente transparente u opaco provoca la pérdida del elemento dado de la imagen, es decir, la disminución del volumen de información transmitida.

Poder resolutivo. La dimensión l de un elemento de la imagen resuelta por el objetivo disminuye al disminuir la longitud de onda λ de la luz y al aumentar la abertura numérica A del sistema óptico:

$$l = \frac{0{,}61\lambda}{A}.$$

La resolución de los sistemas ópticos comunes se determina por medio de fenómenos de difracción. El poder resolutivo de un haz de conductos de luz (como se ha visto en el capítulo III) está limitado no sólo por la difracción de la radiación sino además por una serie de otros parámetros y su calidad es muy inferior a la de los sistemas de la óptica clásica. El límite de resolución de los sistemas ópticos modernos con aberturas numéricas entre 0,5 y 1,0 es igual a 0,5—1 μ, la resolución de los elementos fibrosos hasta el momento no pasa de 4—6 μ. Al nivel actual de conocimientos, el poder resolutivo de un haz de conductos de luz está limitado por una magnitud del orden de 100 líneas/mm y, aplicando métodos especiales para el aumento del poder resolutivo, del orden de 200 líneas/mm. A base de lo antes

dicho, se puede observar que la utilización de un haz de conductos de luz es posible en los casos en que se necesita transmitir haces de rayos con grandes aberturas, los cuales llevan una imagen relativamente basta, y no es aconsejable la utilización de elementos de la fibroóptica para la transmisión de elementos suficientemente pequeños por medio de haces de rayos de abertura relativamente pequeña. En los sistemas ópticos que consisten, por ejemplo, en un objetivo de alto poder resolutivo y un haz de conductos de luz, este último no realiza el poder resolutivo del objetivo y limita la resolución total del sistema objetivo — haz de conductos de luz.

A diferencia de los sistemas ópticos comunes el poder resolutivo de un *haz dado de conductos de luz* no depende de la longitud de onda de la radiación, puesto que aquél se determina en general por el paso de la estructura, o sea, por la distancia entre los centros de los filamentos adyacentes, y es igual para todas las longitudes de onda. Para un haz dado de conductos de luz sólo la transmisión de luz y el coeficiente de transmisión del contraste son los que dependen de la longitud de onda de radiación. Si un elemento fibroso está destinado para una radiación de longitud de onda más corta, entonces el haz de conductos de luz se puede hacer con un poder resolutivo mucho más alto que podría realizarse por aparato óptico.

Sin embargo, la posibilidad de elevar el poder resolutivo de los elementos de fibras a base de la disminución de la longitud de onda de la radiación es, en general, insignificante. Veamos unos ejemplos *extremos* particulares. Consideremos que el diámetro mínimo posible de un filamento conductor de luz D_c debe ser igual a 10 longitudes de onda y que el grosor mínimo δ de la intercalación aislante de luz no debe ser menor que las dos

longitudes de onda de la radiación. Durante la elaboración de los elementos fibrosos, los parámetros geométricos de la estructura se calculan por la frontera de longitudes de onda larga del intervalo de longitudes de ondas de la radiación para el cual están destinadas los conductos de luz. Supongamos que se desea elaborar elementos de fibras con un poder resolutivo posible al máximo para dos intervalos de longitudes de ondas: 0,4—0,8 y 0,2—0,4 μ. Teniendo en cuenta las consideraciones arriba descritas, para el primer intervalo el diámetro del filamento $D_{c1} = 8$ μ y el grosor del aislamiento $\delta_1 = 1,6$ μ, es decir, el paso de disposición $D_1 = D_{c1} + \delta_1 = 9,6$ μ. Esto da lugar a un poder resolutivo nominal $R = (2D)^{-1} = 52$ líneas/mm. Para el segundo intervalo de longitudes de ondas tenemos $D_{c2} = 4$ μ; $\delta_2 = 0,8$ μ; $D_2 = 4,8$ μ y el poder resolutivo nominal $R = 104$ lín/mm. Como podemos observar por los ejemplos vistos, los poderes resolutivos nominales de los haces de conductos de luz para dos intervalos diferentes de longitudes de ondas se determinan por la frontera de longitudes de ondas largas y están relacionados por la dependencia $R_1/R_2 = \lambda_2/\lambda_1$.

De aquí, en la actualidad el poder resolutivo de los elementos fibrosos esté limitado y son pocos los métodos conocidos para su mejoramiento. El poder resolutivo de los sistemas ópticos clásicos es de 5 a 15 veces mayor que el de los elementos fibrosos. Pero no está eliminada la posibilidad de que en un futuro no muy lejano se encontrarán medios de mejoramiento del poder resolutivo de los elementos de fibras realizable por el aparato. En este caso se trata no de un poder resolutivo geométrico de un haz de conductos de luz, puesto que el método de conducción múltiple y fabricación de los conductos de luz multifilares permite obtener cualquier dimensión del diámetro del

filamento unitario, sino de la resolución aceptable por los aparatos de un haz de conductos de luz teniendo en cuenta el coeficiente de transmisión del contraste y la transmisión de luz de un flujo útil de información.

Relación contraste — frecuencia. El coeficiente de transmisión del contraste de los sistemas ópticos comunes tiende a 1 al disminuir la frecuencia de las rayas de la imagen de prueba; para un haz de conductos de luz esto no es posible debido al ruido microestructural objetivo, a no ser que se utilicen medidas especiales tendientes a elevar el coeficiente de transmisión del contraste. Otra diferencia consiste en que, a una frecuencia extrema permitida de las rayas, el coeficiente de transmisión del contraste de los sistemas ópticos tiende a cero y en los elementos de fibras es mayor que cero y puede alcanzar valores hasta de 0,20 a 0,40.

El poder resolutivo y el coeficiente de transmisión del contraste en los sistemas ópticos comunes son máximos en el centro del campo y disminuyen hacia los extremos de éste. En los elementos de fibras de caras planoparalelas todas las características ópticas a nivel del campo son iguales. Si el haz de conductos de luz es planocóncavo o bicóncavo y además los conductos de luz elementales llegan a las superficies de trabajo (extremos) normalmente, entonces el poder resolutivo y el coeficiente de transmisión del contraste prácticamente permanecen constantes en todo el campo de la imagen, tanto en el centro como en los extremos.

Pupila de salida. Los elementos fibrosos tienen difuminados los contornos de la pupila de salida, lo que constituye su desventaja con respecto a los sistemas ópticos comunes y conduce a una disminución de la calidad de la imagen transmitida. La causa de la difuminación de la

pupila de salida se debe a una serie de factores: el doblamiento de los conductos de luz, la diferencia en la forma y carácter de disposición de los filamentos conductores de luz, la variación en las dimensiones y forma de la sección transversal a lo largo de los filamentos elementales, la falta de perpendicularidad de los ejes de algunos filamentos con respecto a las superficies (extremos) de trabajo, la dispersión de la luz en los microdefectos de los filamentos y en la frontera de división filamento — recubrimiento, el desbordamiento de la luz de un filamento a los circundantes, la veladura lateral por la luz del haz de fibras (en este caso la luz lateral al dispersarse en los microdefectos, se dirige al extremo de salida y disminuye el contraste de la imagen), etc.

Cuando los filamentos conductores de luz tienen diámetros pequeños se nota entonces un gran efecto de la difracción en los extremos de entrada y de salida de cada uno de los filamentos sobre la difuminación de la pupila de salida de los elementos fibrosos. En la fig. 121 se representa una dilatación por difracción en la salida de ángulos de inclinación de los rayos de un elemento anular del cono en los límites del cual los rayos salen del filamento. El efecto de los tres anillos se cumple incluso para diámetros muy pequeños de los filamentos pero la figura de distribución luminosa se obtiene sumamente difuminada. La difuminación por difracción de la pupila de salida de los elementos fibrosos para $u_1 \leqslant u_0$ aumente además debido a las componentes Φ_n^c y sobre todo Φ_n^u puesto que esta última sale de los extremos de salida de las intercalaciones aislantes de luz cuyo grosor es menor que el diámetro de los filamentos. Aún cumpliendo el principio de concordancia entre las aberturas (pupilas) de las componentes de lentes y de fibras

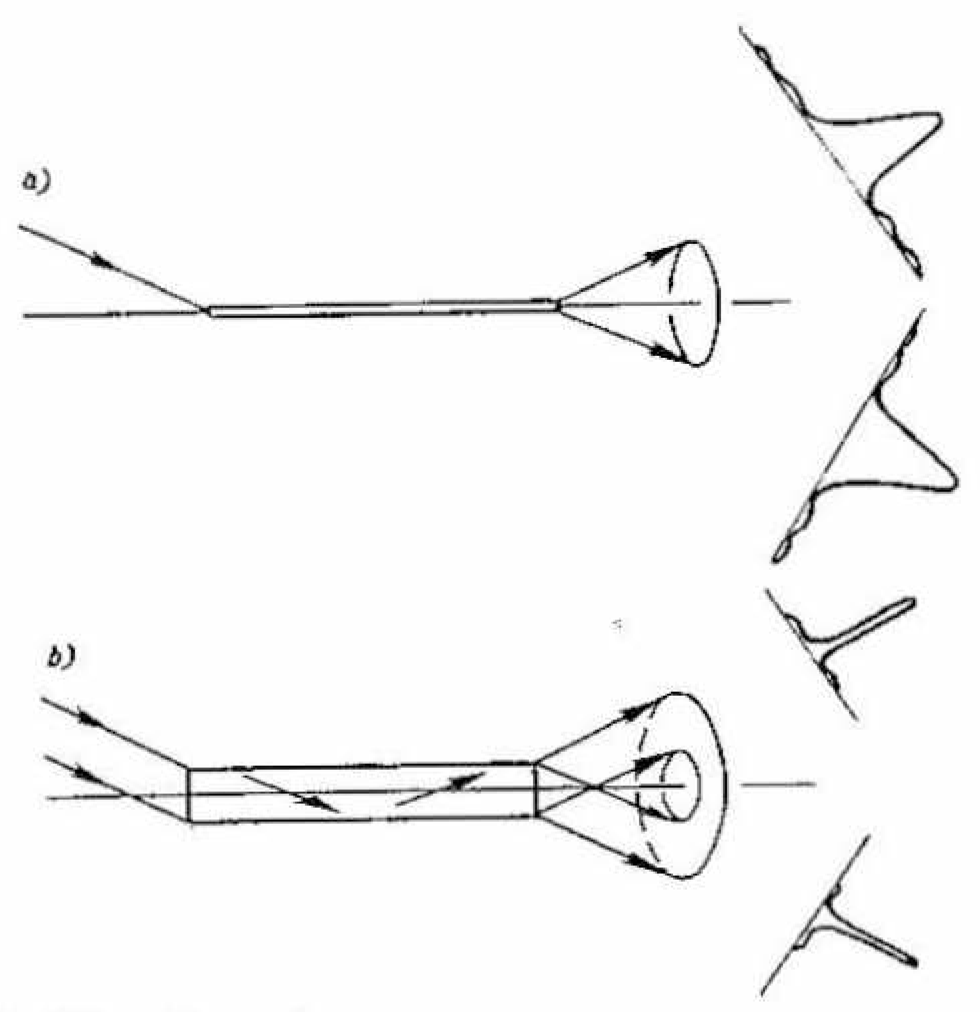


FIG. 121. Dilatación por difracción del anillo de luz en la salida de la guía de luz iluminada con un haz de rayos delgado (paralelo): *a* — conducto fino de luz; *b* — conducto grueso de luz

de un sistema dado, en la pupila de salida incide parte de los rayos y parte de la componente Φ_n^c, o sea, que éstas toman parte en la disminución de la calidad de la imagen. La difuminación por difracción de la pupila de salida de los elementos fibrosos disminuye con la disminución de la longitud de onda de la radiación.

Flexibilidad del canal informativo. Una diferencia fundamental entre los haces de fibras y los sistemas ópticos consiste en la flexibilidad de los primeros, la cual permite utilizar el canal dado

que transmita la información en un régimen dinámico variando constantemente la curvatura del canal. Incluso en el caso de conductos de luz rígidos polifilares, curvos, la transmisión de la imagen a través de un canal estático de curvatura compleja es mucho más simple que como si este canal estuviera compuesto de elementos de la óptica clásica. Indudablemente, la ventaja de los canales de fibras rígidos y flexibles de curvaturas complejas consiste no sólo en la simplicidad de transmisión de la imagen a través de los canales curvilíneos, sino además en la transmisión de haces de rayos con aberturas muy grandes. La construcción de sistemas flexibles de lentes es posible (un ejemplo de ellas son los endoscopios clásicos de lentes), sin embargo, su construcción está supeditada a las leyes del recorrido de rayos a través de un tubo clásico luminoso y, en particular, del recorrido rectilíneo de los rayos. En los sistemas ópticos clásicos la longitud del recorrido rectilíneo libre de los rayos es muy grande, mientras que en los conductos de luz se puede disminuirla prácticamente hasta el infinito.

Es necesario notar que los sistemas flexibles de lentes hasta el momento han sido poco investigados, por lo tanto es imposible llevar a cabo una comparación exhaustiva *con todo el complejo* de características ópticas y de explotación entre éstos y los sistemas flexibles de fibras. El concepto generalizado de que la utilización de los haces flexibles de fibras en los sistemas flexibles tiene una ventaja *absoluta* en comparación con los sistemas de lentes no es totalmente evidente.

En comparación con los sistemas ópticos flexibles existentes por ahora, los dispositivos flexibles de fibras tienen las siguientes ventajas: pequeñas dimensiones seccionales de canal informativo; mayor transmisión de luz en comparación con los sistemas flexibles de múltiples lentes;

alta abertura numérica; invariabilidad de la transmisión de luz y del poder resolutivo durante el doblamiento de los haces de fibras.

División de la imagen en elementos. La separación de la imagen en elementos gracias a la estructura mosaica de los artículos fibrosos es la ventaja fundamental de éstos en la solución de problemas en los que se exige una división de la información en diferentes componentes para un análisis por partes, o la descomposición de estas últimas según una ley determinada. La cuantización de la imagen en *microelementos*, por ejemplo, de dimensiones entre 3 y 10 μ y la codificación y descodificación de éstos por medio de elementos de la óptica corriente es *prácticamente* imposible. Al mismo tiempo, cualquier transformación es ejecutable *en principio* por medio de los elementos ópticos clásicos, incluso la subdivisión en *macroelementos* que se realiza por los elementos fibrosos (la tercera clase); pero en este caso, las dimensiones geométricas y el peso de los transformadores ópticos corrientes en varios órdenes son mayores, y la transformación de luz y la fiabilidad de explotación son mucho más bajas que en los transformadores de fibras de información. En los transformadores ópticos sería necesario el reglaje complejo de una cantidad suficientemente grande de elementos: de lentes, de prismas, de espejos, etc. La flexibilidad de las fibras ópticas da lugar a la realización de transformadores de información altamente compactos y de construcción relativamente simple.

La gran mayoría de las transformaciones de la información luminosa que se llevan a cabo en la actualidad con elementos fibrosos y empleando métodos de la óptica clásica *son prácticamente* irrealizables (el autor no discute una realización en principio, *sin tener en cuenta* las exigencias a un dispositivo concreto).

Las ventajas anteriormente expuestas de los transformadores de fibras sobre los sistemas ópticos corrientes se explican por la gran difusión de los sistemas de conductos de luz de la tercera clase en la construcción de aparatos. Es claro que estas ventajas y entre ellas la compacticidad de los transformadores de fibras, son realizables con ayuda de la óptica clásica; además, la utilización de los elementos de la fibroóptica es inconcebible sin combinarlos con los sistemas ópticos comunes y electronoópticos.

Características respecto al peso. Los transformadores fibrosos de información luminosa organizada y desorganizada tienen menor peso en comparación con los sistemas potenciales de la óptica clásica solamente gracias a la compacticidad y relativa simplicidad en la realización de dicha transformación. En los sistemas donde sea necesaria una transmisión a distancia de la imagen, el peso de los elementos fibrosos es, por regla general, mayor que en los sistemas análogos de la óptica clásica. En realidad, aunque los elementos fibrosos están constituidos por fibras finísimas y ligeras, tienen un peso grande, puesto que la transmisión de la imagen por elementos conduce a la necesidad de la existencia de un filamento unitario conductor de luz rodeado de un recubrimiento luminoaislador por debajo de cada uno de los elementos de la imagen. El material de estos conctuctos de luz es el vidrio, que tiene un peso específico entre 3 y 4 g/cm^3. De otro lado, para un poder resolutivo dado, lo mismo que para el área de los extremos de trabajo, el volumen de la información transmitida y la longitud de los haces de conductos de luz los haces regulares rígidos de fibras tienen un peso menor que los flexibles puesto que a la estructura de estos últimos se agregan la lubricación interfibrosa, el forro primario recubridor, el

forro secundario recubridor que protege contra la acción mecánica exterior y limita el radio de doblamiento de los haces, la armadura de entrada y salida y algunos otros elementos de la construcción de los haces flexibles. En calidad de ejemplo se puede indicar que el peso de los gastroscopios de fibras es de 1,2 a 2 veces mayor que el de los gastroscopios en los cuales han sido utilizados solamente elementos de la óptica común.

Anteriormente se han comparado los elementos de la óptica clásica y de la fibroóptica en cuanto a los parámetros fundamentales de ellos (ver tabla 7). Además de las ventajas y desventajas, expuestas arriba, de los métodos de la fibroóptica y comparadas con la optotécnica común, podemos recordar que la óptica de fibras tiene un amplio campo visual que es difícil alcanzar por la óptica clásica, lo que permite en forma suficientemente simple realigar un campo de la pupila de salida mucho mayor que en la óptica clásica. De esta manera, la fibroóptica tiene ventajas notables y desventajas objetivas. Al ser utilizada en la fabricación de aparatos es necesario *examinar todos los parámetros en su conjunto*, todas las ventajas y desventajas, calcular el efecto económico y técnico de la utilización de los elementos de la fibroóptica en un dispositivo concreto.

16. FIBROOPTICA Y PATENTES DE LA NATURALEZA

Durante largo tiempo los constructores de naves aéreas estuvieron buscando el método de atenuación del flameo, o sea, la vibración de las alas de los aviones. Y sólo a costa de muchas vidas humanas y enormes pérdidas materiales pudo ser construido un dispositivo antiflameo.

Pronto fue determinado que con mucha anterioridad este dispositivo había sido descubierto en la biología durante el estudio de la biomecánica de las libélulas. Es curioso notar que la topografía de los dispositivos contra el flameo en las alas de los aviones y libélulas son completamente análogos.

En la historia de la ciencia y de la técnica hay muchos ejemplos en los que el hombre al hallar la resolución de un problema técnico-científico complejo se daba cuenta de que el problema había sido resuelto hace tiempo y en forma original por la naturaleza y, generalmente, en forma más compacta, elegante e ingeniosa y con mayor fiabilidad. Aquí viene al caso recordar las palabras del filósofo materialista francés del siglo XVIII J. Lamettri: «¡No consideraremos limitados los recursos de la naturaleza! ¡Con la ayuda del arte humano ellos pueden tornarse ilimitados!».

En los últimos decenios la biofísica se ha convertido en objeto de investigaciones minuciosas y atentas por los científicos y no tanto con el fin de una investigación cognoscitiva de los procesos biofísicos, como con el propósito de conocer su sentido para poderlo aplicar en su actividad práctica. Realmente, el conocimiento e investigación de las patentes de la naturaleza ayudan al hombre a realizar el respectivo perfeccionamiento de los procesos, los sistemas, dispositivos y maquinaria que ha creado ya o está creando.

Un caso semejante se puede observar en la fibroóptica. Muchos de los métodos de la fibroóptica hace tiempo que han sido «patentados» por la naturaleza. Veamos unos cuantos ejemplos.

Conductos de luz en nuestros ojos. El ojo humano se puede comparar con una cámara fotográfica en la cual el cristalino (fig. 122) juega

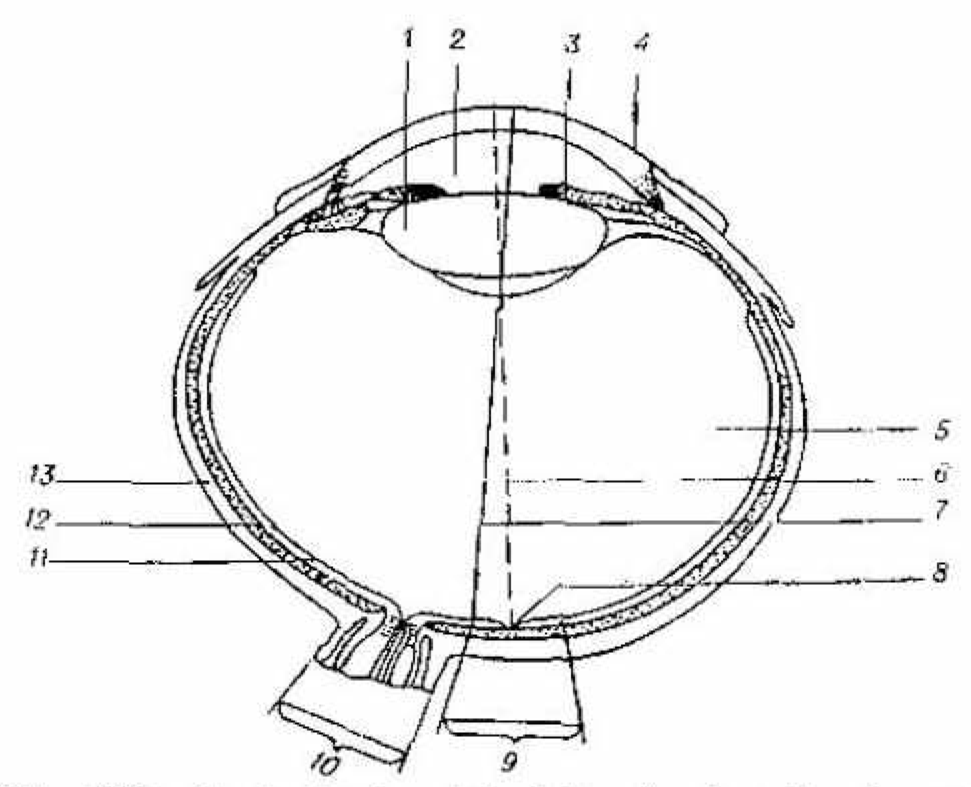


FIG. 122. Corte horizontal del ojo derecho humano: 1—cristalino; 2—cámara delantera; 3—iris; 4—córnea; 5—humor vítreo; 6—ojo visual; 7—eje óptico; 8—hoyo central; 9—mancha amarilla; 10—nervio óptico; 11—retina; 12—capa vascular; 13—esclerótica

el papel de objetivo de enfoque automático. Los músculos que rodean el cristalino hacen variar su curvatura para enfocarlo de esta forma en función de la distancia hasta el objeto y hacer nítida la imagen proyectada a la retina. La retina ha sido creada por la naturaleza en forma de una superficie curvilínea para corregir la curvatura del campo de imagen del cristalino y simplificar de esta manera la «construcción» del cristalino-objetivo.

En el analizador visual (o sea el ojo) la naturaleza ha utilizado muchos métodos y elementos de la fibroóptica, los cuales sólo en los últimos dos decenios han sido descubiertos y diseñados por el hombre.

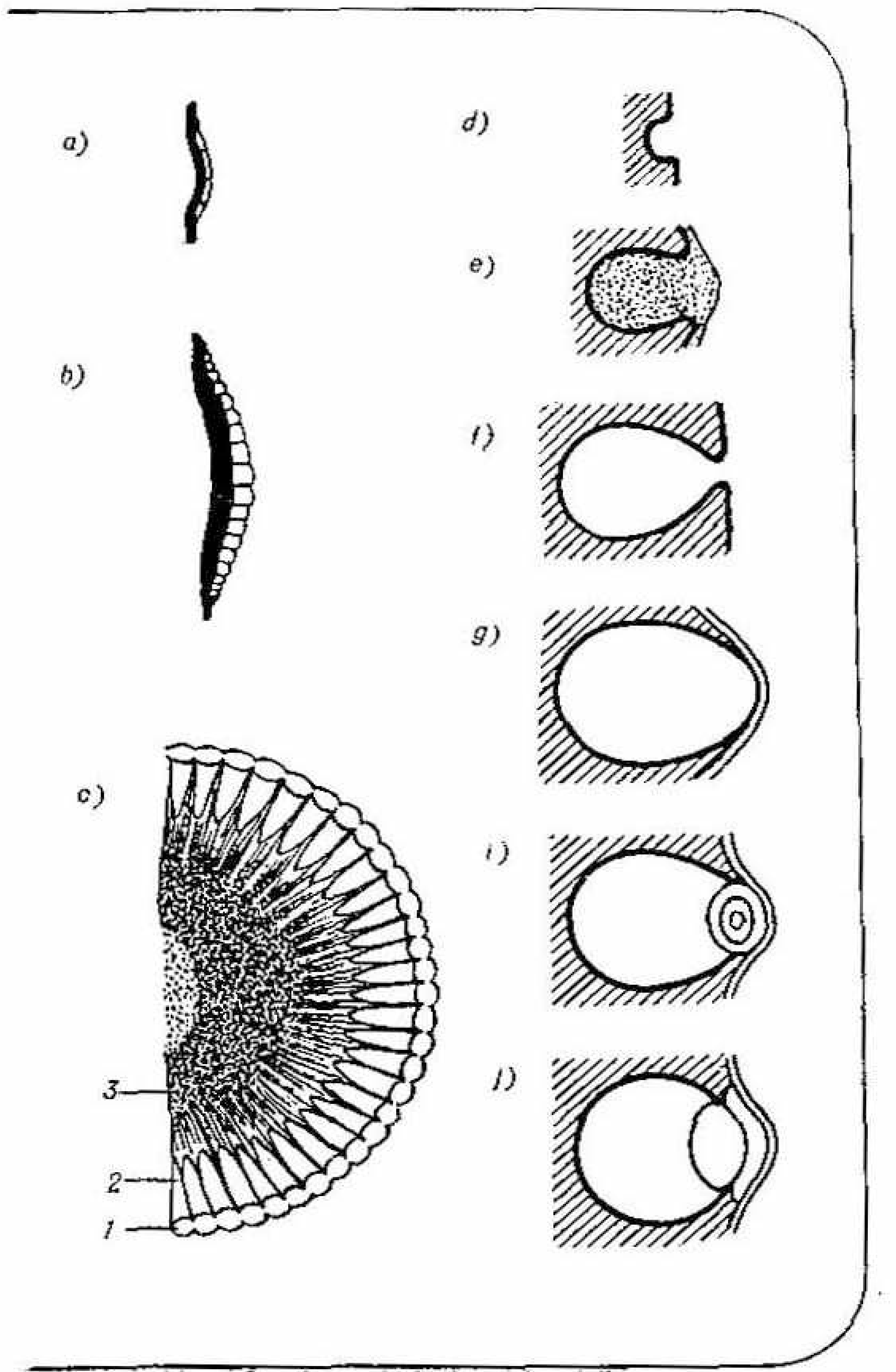
Evolución del analizador visual. El ojo como un órgano individual apareció por primera vez

en la epidermis de los gusanos en forma de varias manchas fotosensibles que permitían solamente determirar de qué lado incidía la luz. El desarrollo posterior continuó por *dos* ramas. La rama del denominado ojo *externo* se caracteriza por una transformación de la mancha fotosensible a una protuberancia (fig. 123, *a* — *c*) de varias células individuales sensibles a la luz. Al desarrollarse posteriormente la protuberancia cada una de estas células se fue haciendo más fina y más profunda. La célula desempeñaba el papel de un conducto de luz monofilar cónico estrechado, en cuyo extremo menor (fondo de la célula) había un elemento fotosensible. El conducto de luz estrechado (ver el cap. II), en la parte del extremo mayor tiene una pequeña abertura numérica, la cual disminuye al aumentar la diferencia entre los extremos de entrada y de salida. Lógicamente, cuanto más profunda y delgada sea la célula tanto mejor determinaba la dirección de incidencia de la luz.

El haz de tales conductos de luz en forma de ojo daba una información más detallada sobre el medio ambiente. Este tipo de ojo exterior es el que tienen los insectos (fig. 124), entre otros, el ojo de la libélula que se alimenta de pequeñas moscas que atrapa al vuelo, contiene hasta 25 000 celdillas-conductos de luz individuales. Este ojo externo complejo, según el

——→

FIG. 123. Esquema del desarrollo del ojo exterior (*a*—*b*) e interior (*d*—*g*): *a* — mancha fotosensible del ojo exterior; *b* — celdillas epiteliales; *c* — ojo complejo; *d* — mancha fotosensible cóncava; *e* — cavidad llena de sustancia transparente; *f* — cavidad abierta; *g* — cavidad cerrada de córnea y llena de humedad vítrea; *h* — cavidad cerrada con la humedad vítrea y el cristalino; *i* — cavidad cerrada con córnea, cristalino y cámara delantera: *1* — córnea; *2* — cristalinos cónicos; *3* — retina.


a)
b)
c)
3
2
1
d)
e)
f)
g)
i)
j)

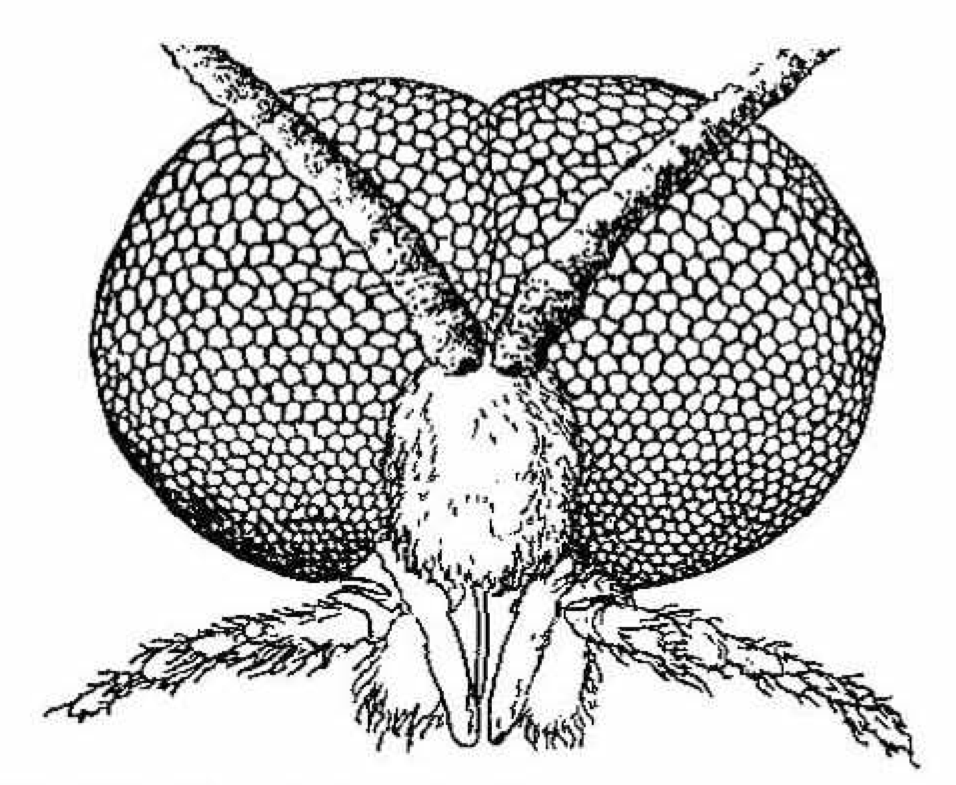


FIG. 124. Ojos de insectos (de una mosca)

principio de transmisión de la información, es análogo a un objetivo focón (ver el cap. III). Es interesante señalar que la estructura del ojo de los insectos está constituida por conductos de luz de forma seccional aproximadamente *hexagonal* para obtener un relleno máximo del extremo de entrada con filamentos conductores de luz.

De la mancha fotosensible situada en la epidermis del gusano parte también la segunda rama de desarrollo del analizador visual, o sea, la rama del denominado ojo *interno* con que cuentan todos los vertebrados, incluso el hombre. El esquema de desarrollo del ojo interno viene dado en la fig. 123, *d* — *i*. La imagen de los objetos en los ojos de los vertebrados (fig. 122) se forma en la retina que cubre el fondo del globo del ojo. La retina corrige, de modo semejante a los correctores fibróopticos del campo, la curvatura del campo de la imagen. Pero aquí no termina la analogía entre ellos. La retina en la penúltima

capa de las 10 que tiene, posee elementos fotosensibles, o sea, conos y bastoncillos; así pues, el ojo, al igual que los elementos fibrosos elabora la información por elementos mediante la cuantización de la imagen. Sin embargo, el ojo supera a los artículos fibroópticos en la densidad de elementos fotosensibles, aunque ya en algunos productos fibrosos el número de fibras se acerca a mil millones. Por ejemplo, la retina contiene cerca de 7 millones de conos y alrededor de 130 millones de bastoncillos. Como comparación recordemos que la imagen en blanco y negro de la pantalla de un televisor contiene unos 250 mil elementos; un microscopio transmite cerca de 500 mil elementos: una buena fotografía común de pequeño formato contiene hasta varios millones; una fotografía de superior cualidad y gran tamaño, hasta varias decenas de millones de elementos.

La naturaleza ha resuelto en una forma muy original el problema de atenuación de la luz difusa y de elevación del contraste. En la fibroóptica esto se efectúa empleando un recubrimiento semitransparente. En el ojo, detrás de la capa de bastoncillos y conos, hay una capa de pigmento moreno cuyos gránulos penetran entre los elementos fotosensibles cuando incide sobre el ojo demasiada luz. El pigmento moreno atenúa la luz difusa en la capa fotosensible, aumenta el contraste y protege los bastoncillos y los conos contra la acción de una iluminación excesiva. Este pigmento actúa automáticamente, como si mantuviera un equilibro entre la transmisión de luz y el coeficiente de transmisión del contraste. La acción de este pigmento es análoga a la de los revestimientos aisladores de luz fotocromáticos, los cuales bajo la acción de un flujo luminoso pequeño casi no se oscurecen, o sea, transmiten mayor luz sin variar

el contraste, y bajo una fuerte iluminación se oscurecen en un grado mayor, atenuando de esta forma la transmisión de luz y aumentando el contraste. Recordemos que el hombre pudo llegar a resolver el problema de los revestimientos fotocromáticos solamente en 1968; mientras que la eficiencia «técnica» y la elegancia de la resolución de este problema por la naturaleza son, sin duda, más altas.

Poder resolutivo del ojo y de los elementos fibrosos. El poder resolutivo se determina por las dimensiones del elemento: el diámetro del cono en los ojos y el diámetro del filamento en los sistemas de conductos de luz. Al observar un objeto voluminoso cuya imagen cubre un gran número de conos, el ojo puede distinguir sobre la superficie del objeto muchos detalles distintos. Al alejar el objeto las dimensiones de la imagen y el número de conos excitados se reduce, por lo que disminuye respectivamente el número de detalles distinguibles. Al observar dos puntos luminiscentes dispuestos uno cerca del otro, en dos áreas vecinas de la retina se forman dos imágenes de difracción. Para distinguir dos puntos de un otro más brillante es necesario que entre las imágenes de estos puntos se encuentre por lo menos un cono que sea iluminado más débilmente. Este mismo principio aparece en la fibroóptica: para poder distinguir dos puntos es preciso que entre éstos quepa por lo menos un filamento conductor de luz con otro brillo.

En la actualidad, en los elementos fibrosos de poder superresolutivo el diámetro de los filamentos conductores de luz está entre 2 y 3 μ. Determinemos el diámetro de los conos en el ojo humano. Durante el día un ojo normal tiene un poder resolutivo de un minuto angular. La distancia focal del ojo es de cerca de 17 mm.

A una distancia angular entre dos puntos visibles igual a 1 min, la distancia lineal entre los centros de sus imágenes en la retina es igual a $17 \times 0{,}0003 = 0{,}005$ mm $= 5$ μ. Comparando este resultado con la condición necesaria de tener entre los imágenes de dos puntos contiguos por lo menos un cono con su iluminación sensiblemente menor, podemos ver que el diámetro del cono en la cavidad central del ojo no puede ser mayor de 2—3 μ. En otras palabras, la dimensión del cono en el analizador visual del hombre es igual al diámetro del filamento en los elementos de superresolución de la fibroóptica.

Visión crepuscular. La tarea de los bastoncillos y los conos en el ojo es diferente para cada uno: los bastoncillos son mucho más sensibles a la luz y constituyen la visión crepuscular (visión escotópica), los conos, para los cuales es necesaria una gran cantidad de luz, funcionan de día (visión fotópica) y dan la posibilidad de distinguir los colores. Al caer el crepúsculo la cantidad de luz que incide sobre el ojo disminuye, a pesar de la dilatación de la pupila, de aquí que la sensibilidad de los conos resulta insuficiente, se atenúa y posteriormente desaparece la distinción de colores. Aquí comienzan a actuar los bastoncillos.

El gran número de bastoncillos periféricos que ocupan en la retina una amplia área mucho más que el área de un cono, y que corresponden a una sola fibra nerviosa de la visión, captan el flujo luminoso en forma semejante a los colectores ópticos fibrosos en una sola fibra del nervio óptico. Así se logra ver bajo una iluminación externa baja.

La conexión de muchos bastoncillos en una sola fibra del nervio óptico como si aumentara el área del elemento fotosensible unitario. Al

igual que disminuye el poder resolutivo de los sistemas conductores de luz, debido al aumento del diámetro del filamento, ocurre también con el poder resolutivo del ojo. Para el ojo humano la distancia angular mínima entre dos objetos distinguibles de noche, dispuestos uno cerca del otro, es aproximadamente un grado (en lugar de un minuto durante el día). A la vez disminuye la sensibilidad de contraste del ojo.

La existencia de una visión diurna y crepuscular en el hombre lograda por diferentes elementos fotosensibles tiene una analogía en la fibroóptica con los elementos conductores de luz policromáticos. Estos últimos están constituidos por filamentos conductores de luz alternativos, transparentes en las diferentes partes del espectro de radiación. Al emplear un fotorreceptor que sea sensible en un intervalo dado de longitudes de ondas de radiación, de todo el complejo de fibras se utilizan sólo aquellas que sean transparentes en este intervalo. Si es necesario el análisis de la información transmitida por el mismo elemento fibroso policromático, en otro intervalo de longitudes de ondas de radiación se efectúa un cambio colocando un nuevo fotorreceptor con la sensibilidad espectral correspondiente. El cambio de fotorreceptores es equivalente en este caso a la adaptación visual, o sea, la reconstrucción de la vista de un nivel de iluminación a otro, el cambio de la luz por la oscuridad y viceversa.

Análogo de los elementos fibrosos de vibración. Por la óptica clásica se sabe que la imagen óptica formada en un vidrio mate se torna más nítida si se pone este vidrio en movimiento rápido, por ejemplo, en un movimiento giratorio.

Al poner en vibración sincrónica los dos extremos de un haz de fibras su poder resolutivo aumenta más o menos al doble y, lo más impor-

tante, desaparece el efecto mosaico de la estructura.

Este efecto, ampliamente difundido en la fibroóptica en los últimos años, ha sido utilizado por la naturaleza mucho antes de que el hombre lo descubriera. El globo ocular se encuentra en un movimiento automático constante (en oscilaciones), lo que da como resultado que la imagen de los objetos se desliza constantemente de tal forma que oscila en la superficie de la retina. Esta oscilación continua de la retina nivela su estructura granular aproximando su efecto al que tendría una capa fotosensible sin estructura.

Cristalino del ojo y fibroóptica. Si comparamos una cámara fotográfica con el ojo humano, el equivalente del fotoobjetivo sería el cristalino. Pero se les puede comparar sólo en que ambos forman la imagen de un objeto externo.

Efectivamente, las últimas investigaciones de los científicos de la Universidad Lomonósov de Moscú Popov V. N. y Simakov Yu. N. han descubierto tales secretos del cristalino que hasta un objetivo ultraperfeccionado con la mejor óptica al lado de éste parece un dispositivo primitivo.

El cristalino del ojo crece toda la vida; entre otras cosas, las células viejas no se desprenden como ocurre en los demás órganos. Las células de la parte anterior del cristalino, o sea los epitelios, se transforman en fibras las cuales, al madurar, se desplazan hacia el centro y ceden el lugar a las células jóvenes.

Los científicos han podido observar que el rayo láser, al coincidir con el eje óptico del cristalino, no llega hasta la retina. El rayo desplazado un poco a un lado, transpasa el cristalino como una lente óptica común formando la

imagen en la retina. Las investigaciones de las fibras del cristalino han demostrado que éstas tienen la forma *hexagonal* de una longitud entre 9 y 10 μ, y diámetro de cerca de 2,0 — 2,5 μ y además todas las fibras están cubiertas de una sustancia cementante la cual las une en forma de capas. El índice de refracción de este recubrimiento (envoltura) es menor que el de la fibra. El recubrimiento es altamente transparente y por esto absorbe muy poco la luz. ¡Por lo anterior visto, podemos observar que el haz de células vivas en el cristalino del ojo no es más que un elemento fibroóptico corriente!

Las fibras conductoras de luz del cristalino se encuentran dobladas en forma de S. Esta forma les permite jugar el papel de una placa de resorte que puede ayudar al cristalino durante su acomodación o sea, cuando ésta cambia su curvatura. El extremo de entrada de las fibras se encuentra en la parte anterior de la superficie del cristalino, en los campos donde los rayos de luz empiezan su recorrido por el ojo. Los extremos de salida se encuentran en la parte posterior de la superficie dirigida hacia la retina.

Cuando existe una iluminación fuerte la pupila se contrae. La mayor parte de la luz que incide sobre la pupila, se difunde por los conductos de luz vivos y su pequeña porción atraviesa el cristalino y forma en la retina la imagen. Los rayos transmitidos a través de los conductos de luz se encuentran con los núcleos situados en cada una de las fibras y se dispersan. El cristalino luce en este caso en forma parecida a una linterna mate iluminando toda la retina. Esto provoca una nivelación del contraste en la retina entre la luz y la sombra. Nunca percibimos variaciones tan fuertes del contraste como las que resultan en las fotografías de los fotógrafos novatos.

En los crepúsculos, cuando la pupila está dilatada, la mayoría de los rayos llega hasta la retina rodeando el haz de fibras; la iluminación en la cámara visual resulta débil. Más nítida llega a ser la imagen y nosotros distinguimos mejor los objetos a pesar de la mala iluminación.

Además, las fibras ópticas vivas conducen la luz hasta las células del epitelio facilitando de esta forma su crecimiento.

Las investigaciones de los científicos de la Universidad Lomonósov de Moscú han demostrado que el cristalino es un depósito de plomo en el organismo vivo. Inicialmente el plomo es poco, pero a medida que el cristalino madura, todo el plomo como si se congregara en ello. Este resultado es bastante interesante si se recuerda que la gran mayoría de los vidrios utilizados en la fabricación de filamentos conductores de luz de los elementos fibroópticos artificiales son a base de plomo, es decir, contienen en su estructura una gran cantidad (a veces hasta un 60% del peso) de este elemento.

Guías de ondas de fibras en nuestros ojos. Al disminuir el diámetro de los filamentos de los conductos de luz hasta las dimensiones comparables con la longitud de onda de la radiación transmitida, las fibras funcionan como las guías de ondas, es decir, transmiten determinado tipo de ondas y la distribución luminosa a la salida del extremo de filamentos no toma un valor medio sino que tiene el aspecto correspondiente a un tipo dado de onda.

Las investigaciones de los últimos 10—15 años, que han sido estimuladas por la aparición e impetuoso desarrollo de la fibroóptica, han demostrado que en los ojos de los mamíferos no sólo existen conductos de luz fibrosos sino además guías de onda fibrosas.

La cantidad de tipos de ondas que pueden difundirse por el filamento dado con parámetros concretos se determina por el parámetro característico $R = \frac{\pi D_c}{\lambda} A_0$, donde λ es la longitud de onda de radiación en el aire. Cuanto es menor el parámetro R, tanto menor será el número de tipos de ondas que puede transmitirse a través de una fibra dada.

El diámetro de algunos elementos fotosensibles, como los conos y los bastoncillos en la retina del ojo de los mamíferos se aproxima a la longitud de onda de la luz, por lo cual éstos tienen las propiedades de las guías de onda. Ya hace más de 100 años se sabe que el índice de refracción de los elementos fotosensibles de la retina es mayor que el de la sustancia intercelular que rodea estos elementos (el índice de refracción de la sustancia oscila en un intervalo entre 1,334 y 1,347). La distancia entre los elementos es algo mayor que la longitud de onda de la luz, por lo que no se viola la condición de reflexión interna total, y la luz no se infiltra entre los elementos vecinos. De esta manera, la sustancia intercelular de baja refracción juega el papel de intercalaciones aislantes de luz. Los diámetros y el índice de refracción de los elementos fotosensibles se encuentran en tales intervalos de magnitudes que el valor del parámetro R no es grande con que se realiza el mecanismo de guía de ondas en la difusión de la luz.

Las investigaciones experimentales sobre los elementos fotosensibles de la retina del ojo de los mamíferos (ratas, conejos, primates y hombre) han demostrado que estos elementos transmiten la radiación en forma de guías de ondas. El aspecto de distribución de la luz en diferentes tipos de ondas es prácticamente igual

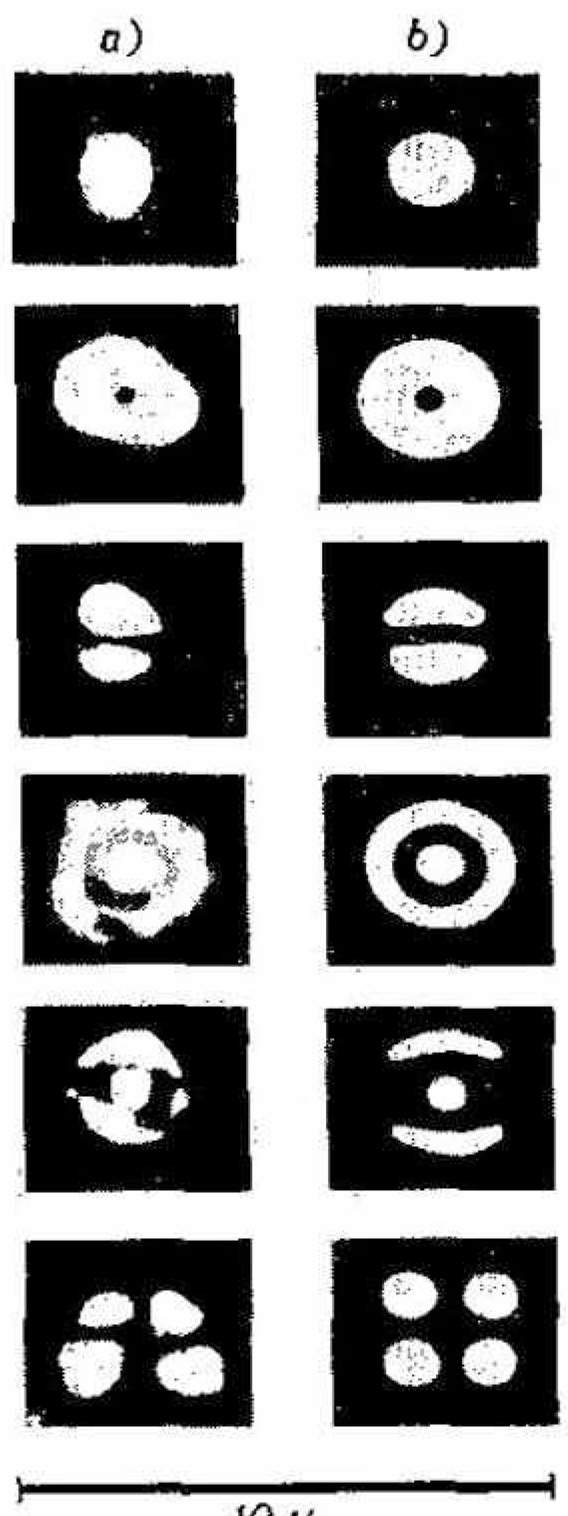
en las guías de ondas naturales y artificiales (fig. 125).

Por medio de investigaciones se ha llegado a la conclusión de que muchas peculiaridades de la transferencia de radiación por medio de guías de ondas artificiales tienen lugar también en las guías de ondas del ojo: la dependencia entre la distribución de luz en el extremo de salida y el tipo de la onda difundida en función de la longitud de onda de radiación, la interrelación de las diferentes guías de ondas, la dependencia de la distribución de luz respecto al ángulo de incidencia a la entrada, y otros.

Septrón de fibras en el aparato auditivo. En los septrones fibrosos las señales sonoras se analizan gracias a la vibración de cada fibra; la amplitud y la frecuencia del sonido recibido se fijan por medio de una máscara. Esta máscara es iluminada con luz que pasa a través de las fibras que vibran, o sea, la información sonora se transforma en un análogo luminoso y se analiza. A base de los septrones de fibras vibra una varilla fija en consola bajo la acción de un sonido externo.

Un principio análogo, pero realizado de una manera más sutil, es utilizado en el aparato auditivo de los animales y del hombre, el cual juega un papel no sólo de analizador de audio (parecido a los septrones de fibras) sino que además permite determinar la dirección de la posición de la fuente de sonido y es también un órgano de equilibrio.

En los anfibios, reptiles y aves las ondas sonoras inciden sobre el tímpano obligándolo a realizar vibraciones, las cuales se transmiten al huesecillo auditivo que se encuentra unido al tímpano; el otro extremo del huesecillo auditivo se apoya contra la membrana de la ventana oval, es decir, puede moverse libremente; esta


a)
b)
10 µ

movilidad es necesaria para que haya una transmisión efectiva de las vibraciones del tímpano al oído interno. De esta manera el sonido se analiza con ayuda únicamente de un huesecillo auditivo fijo en consola (de una sola fibra), sin necesidad de transformarlo en información de la luz.

En los mamíferos, incluyendo al hombre, la construcción del aparato auditivo es más compleja (fig. 126). A través del conducto auditivo *I* (oído externo), el sonido llega al tímpano *1*. Este último separa el oído externo del oído medio *II*. Las vibraciones se transmiten del tímpano al martillo *2*, el cual se encuentra adherido junto con el tímpano por el mango *5* en toda su extensión. Su otro extremo, por medio de una ligazón, está unido al yunque *3* y este último, al estribo *4*. El martillo *2*, el yunque *3* y el estribo *4* forman entre sí una especie de conexión articulada flexible que les permite una suficiente libertad para sus vibraciones. El sonido en forma de vibraciones se transmite del estribo al oído interno *III* de donde la señal, a través del nervio auditivo *6*, llega a la corteza encefálica, donde se produce el análisis de la información recibida. El oído humano, en promedio, es capaz de distinguir sonidos con un número de oscilaciones comprendido entre 16 hasta 20 000 vibraciones por segundo.

Vemos, a primera vista que los principios de acción de un septrón natural y de un analizador de sonidos fibroso tienen gran analogía; sin embargo, existen entre éstos diferencias

←——

FIG. 125. Cuadros típicos de distribución de luz característicos para diferentes tipos de ondas, fotografiados con luz monocromática en las caras de salida de elementos fotosensibles: *a* — retina del ojo humano y del ojo del mono saimiri; *b* — conductos fibrosos de vidrio de ondas

esenciales. Con el objeto de crear las condiciones para un análisis efectivo de la señal el septrón de fibras transforma la información sonora o de audio en luminosa y analiza solamente «la imagen luminosa» del sonido. Cualquier transformación de las informaciones trae consigo una pérdida de información. En un septrón natural no existe esta clase de transformación.

En el septrón de fibras las fibras unitarias son elementos sensibles a la amplitud y frecuencia de oscilaciones. La cantidad de estas fibras determina la capacidad de información del sistema. Rigurosamente hablando, los septrones de fibras tienen una sensibilidad discreta en cuanto a frecuencia se refiere. En el aparato auditivo el tímpano es un elemento sensible a la amplitud y frecuencia en un intervalo de frecuencias, prácticamente continuo, que cubre desde 16 hasta 20 000 vibraciones en un segundo. Hay que anotar que las peculiaridades de la construcción de un septrón de fibras permiten ampliar la gama de frecuencias permitidas tanto hacia las frecuencias más bajas como hacia las frecuencias más altas.

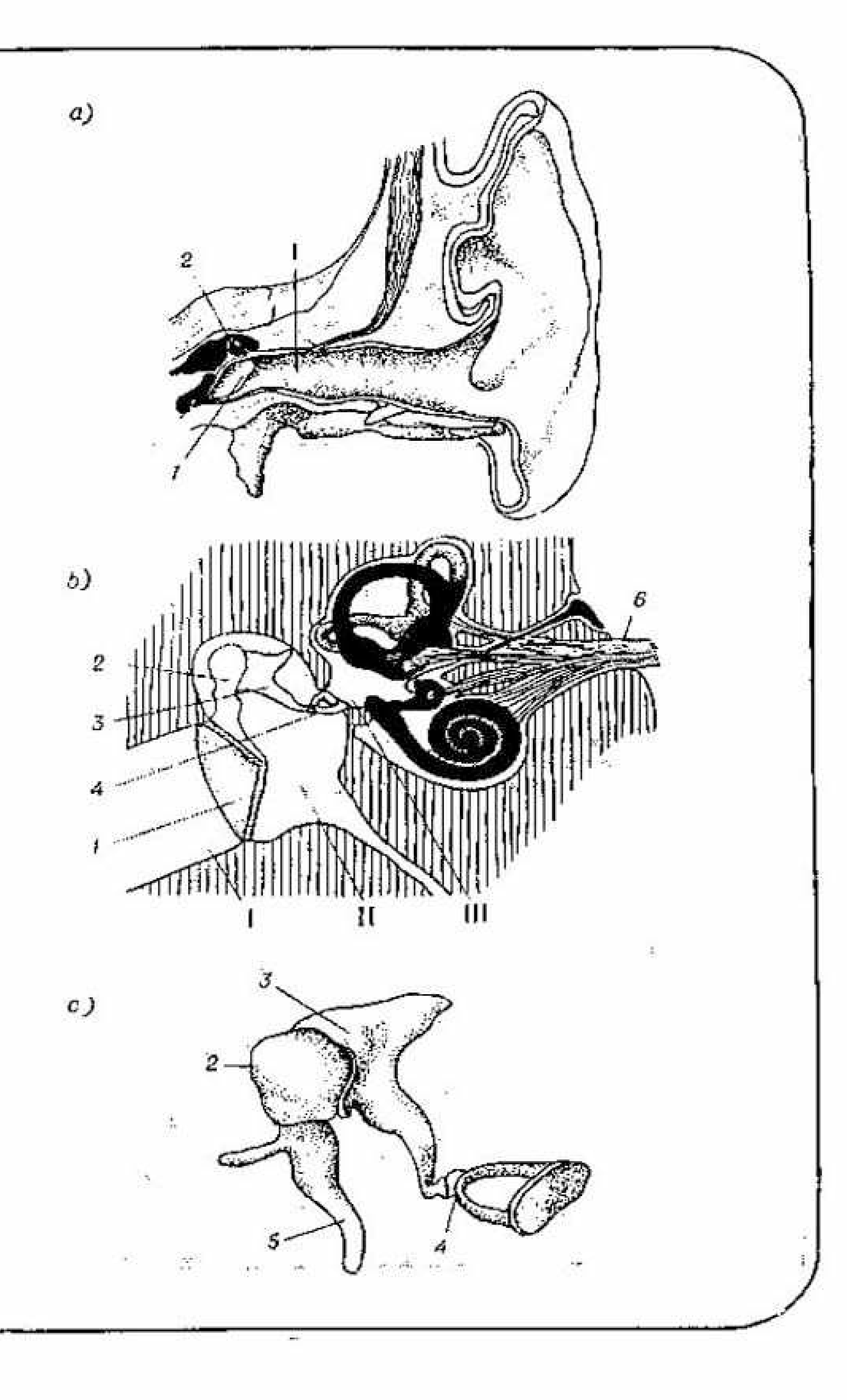
Los tamaños de los septrones de fibras son mucho mayores que las dimensiones del aparato auditivo junto con su analizador. Recordemos que los tres huesecillos auditivos son los huesos más diminutos que existen en el esqueleto de los mamíferos.

Actualmente se realizan esfuerzos para utilizar las peculiaridades positivas de los septrones naturales en la elaboración de los septrones

——→

FIG. 126. Esquema de la estructura del aparato auditivo humano: *a* — sección vertical del pabellón de la oreja; *b* — esquema del aparato auditivo; *c* — esquema del huesecillo auditivo:

1—tímpano; *2*—martillo; *3*—yunque; *4*—estribo; *5*—mango de martillo; *6*—nervio auditivo


a)
2
I
1
b)
2
3
4
1
6
I
II
III
c)
3
2
5
4

a)

b)

10

c)

10

d)

sintéticos (artificiales), incluso para los analizadores óptico-acústicos. En particular, la transmisión del riquísimo colorido del timbre sonoro, por medio del aparato acústico humano con ayuda del tímpano y de un huesecillo fijo en consola, nos lleva a la idea de que, no en vano, la naturaleza ha fijado el martillo a través de su mango en toda la extensión de la membrara (tímpano) desde la periferia hasta el centro (fig. 126) y en la transmisión simultánea de sonidos de diferentes frecuencias y amplitudes a través de un sólo martillo, desempeña, por supuesto, un papel primordial la construcción «focónica» de este último.

Minerales naturales — pieza fibrosa. En la naturaleza existen cristales con estructura fibrosa que poseen propiedades ópticas semejantes a los elementos fibrosos creados artificialmente. En particular, estos elementos transmiten una imagen de una superficie a otra. Como ejemplos de estos minerales se pueden citar la selenita y la ulexita.

En la *selenita* la luz pasa a través de diferentes cristales como a través de fibras ópticas. Como luminoaislador sirve la eutéctica, que llena el espacio entre los cristales. La abertura numérica de la selenita es de 0,20—0,30 por esta razón la imagen se transmite solamente por los rayos con abertura muy pequeña, lo cual limita el campo de empleo de este material natural.

La *ulexita* se encuentra, generalmente, en forma de inclusiones esféricas en los yacimientos de bórax y en las capas de sal con un tamaño

⟵

FIG. 127. Transmisión de la imagen de la mira a través de un cristal de ulexita: *a* — cristal; *b* — fotografía de la mira; *c* — imagen transmitida por la ulexita; *d* — calidad de la imagen transmitida por la ulexita (baja)

hasta de 100 mm, por ejemplo, en los EE.UU. (el desierto de Mojave), en Chile, en Argentina y otros países. Comúnmente, la estructura fibrosa de este mineral no es regular. En la variedad de ulexita hallada en California, las fibras están orientadas paralelamente una a otra. En ausencia de impurezas extrañas estas fibras son suficientemente transparentes. Si cortamos la ulexita perpendicularmente a los ejes de las fibras y pulimos sus caras, ésta puede transmitir una imagen (fig. 127), resolviendo en este caso hasta 10 líneas/mm. La estructura de la ulexita es muy variada en cuanto al tamaño y la forma de las fibras elementales, además las fibras separadas se diferencian bastante en cuanto a su transmisión de luz. Todo esto conduce al gran ruido estructural de los elementos fibrosos de ulexita.

Lo anterior se explica por la estructura de la ulexita. Este mineral posee una estructura cristalográfica triclínica, es decir, su índice de refracción es diferente en tres direcciones mutuamente perpendiculares. Así pues, si el eje de las fibras se hace coincidir con la dirección OX, los índices de refracción de la ulexita en las tres direcciones son iguales a $n_x = 1{,}501$, $n_y = 1{,}491$ y $n_z = 1{,}520$. El problema del aislamiento luminoso en los manojos de fibras de ulexita creados por la naturaleza ha sido resuelto de una manera muy ingeniosa. Puesto que en la dirección del eje óptico de las fibras (eje OX) el índice de refracción es $n_x = 1{,}501$, en tanto que la orientación de las fibras en las otras dos direcciones es desordenada, la dirección del índice de refración máximo n en una fibra puede coincidir con cierto valor intermedio en la otra fibra, incluso con $n_y = 1{,}491$. Como resultado de esto, se crea una frontera de separación de los materiales con diferentes índices de refrac-

ción. Sin embargo, en este caso, de las dos fibras vecinas una resulta ópticamente aislada; en la otra, en cambio, no se cumple la condición de reflexión interna total. Por esta razón las aberturas numéricas de las fibras separadas son diferentes; las fibras separadas se distinguen también por su transmisión de luz. La abertura de todo el haz es igual a un cierto valor estadístico medio de las aberturas de las fibras separadas. La diferencia máxima posible entre los índices de refracción es $n_z - n_y = 0{,}029$, lo cual corresponde a una abertura numérica $A_0 = 0{,}30$.

Aunque la ulexita es un material natural fibroóptico interesante, no ha encontrado una utilización práctica, puesto que los cristales de tamaños grandes son muy escasos. Además, su baja abertura numérica, su poco poder resolutivo y la heterogeneidad de su estructura, constituyen restricciones considerables.

CONCLUSIÓN

La variedad de los elementos fibrosos está limitada, primero, por la imaginación de los diseñadores de instrumentos y , segundo, por la factibilidad tecnológica del elemento fibroso requerido. Observemos que en la última década la fibroóptica en la URSS experimentó una ampliación continua y considerable del arsenal de procedimientos tecnológicos para el diseño, perfeccionamiento y fabricación de elementos fibrosos. Por otra parte, prácticamente cada día aparecen nuevas sugerencias, a veces inesperadas, acerca de la utilización de la fibroóptica en la fabricación de instrumentos.

Por lo visto, una de las causas de esto es que precisamente en los últimos seis—ocho años los diseñadores de diversos dispositivos obtuvieron elementos fibrosos factibles tecnológicamente y al mismo tiempo se convencieron de las grandes posibilidades técnicas de éstos y de sus deficiencias objetivas, enterándose además de las causas que limitan su utilización en la construcción de instrumentos. Esto último, naturalmente, condujo a la búsqueda de principios y de métodos de construcción en los cuales la acción de estas restricciones se ha reducido al mínimo posible.

Los fundamentos de la fibroóptica expuestos en este libro en esencia ponen al descubierto el estado actual de los métodos de elaboración y ciertas ramas de gran perspectiva en la técnica de la conducción de la luz. El ritmo del desarrollo de la fibroóptica y la ampliación de su utilización, lo mismo que la profundidad de los trabajos de investigación científica, según los métodos de la técnica de conducción de la luz, conducen a una revelación cada vez más precisa de las ventajas realmente efectivas y factibles en la práctica y de los principios de utilización de los elementos fibrosos y de sus desventajas objetivas.

El conocimiento de estos factores estimula a científicos e ingenieros a buscar los métodos para eliminar tales inconvenientes y para ampliar las posibilidades de la fibroóptica. Lo principal, lo básico o, en otras palabras, el profundo potencial de la fibroóptica hasta ahora empieza a manifestarse y los próximos diez—quince años serán años de grandes e interesantes descubrimientos.

A NUESTROS LECTORES:

«Mir» edita libros soviéticos traducidos al español, inglés, francés, árabe y otros idiomas extranjeros. Entre ellos figuran las mejores obras de las distintas ramas de la ciencia y la técnica: manuales para los centros de enseñanza superior y escuelas tecnológicas; literatura sobre ciencias naturales y médicas. También se incluyen monografías, libros de divulgación dientífica y ciencia-ficción.

Dirijan sus opiniones a la Editorial «Mir», 1 Rizhski per., 2, 129820, Moscú, I-110, GSP, URSS.

MIR PUBLICA

LOS SIGUIENTES

LIBROS: 1977

CURSO

DE MINERALOGIA

BETEJTIN A.

El académico Anatoli Betejtin, notable científico soviético, en su manual dedicado al estudio de los cristales analiza con plentitud y claridad las nociones modernas sobre las propiedades físicas y químicas de los minerales; se estudia su ligazón mutua con su composición y estructura cristalina. El autor investiga la naturaleza de las combinaciones de los minerales y el carácter sucesivo de su formación compleja en menas y rocas, plantea la forma de empleo de esta naturaleza en la búsqueda y prospección geológica de los yacimientos de minerales.

En el libro se presta atención particular a los conocimientos concretos que contribuyen a la determinación exacta de los minerales y a la aclaración de las condiciones de su distribución en la naturaleza.

El autor recurre a las útimas realizaciones de las ciencias exactas en las que se fundamenta la mineralogía para mostrar que las propiedades más importantes de los minerales dependen de las particularidades

de la estructura de la sustancia cristalina. Además del índice de materia, figura una relación de los minerales más importantes, según los metales (elementos) principales. El «Curso de mineralogía» ha sido utilizado por generaciones enteras de geólogos soviéticos y es de gran provecho para los estudiantes de facultades de investigación geológica. Su valor a nivel del conocimiento científico lo hace muy útil para aquellos que se interesan por la mineralogía como ciencia.

La obra ha sido reeditada en ruso y traducida al español inglés y francés.

ENIGMAS DE MICROMUNDO

CHERNOGOROVA V.

La autora de este libro colabora en el instituto de investigaciones nucleares de la ciudad de Dubna donde durante doce años ha participado en los experimentos en el sincrociclotrón. Los resultados de este trabajo aparecen en una serie de obras científicas que ponen a conocimiento del lector las propiedades de los muones.

En este libro Vera Chernogórova se refiere a las investigaciones más recientes en la rama de las partículas elementales. Según A. Baldin, miembro correspondiente de la Academia de Ciencias de la URSS, no existen todavía monografías ni trabajos de divulgación científica sobre una serie de problemas planteados en este libro.

No es sorpresivo entonces que esta obra sea una especie de reportajes desde la línea principal de la ciencia: las ciudades de Dubna y de Serpujov donde funciona el sincrofasortón uno de los más grandes del mundo, de los laboratorios de los más prominentes científicos soviéticos.

La ausencia de cálculos complejos y la exposición figurada hacen el libro accesible al amplio círculo de lectores que no poseen preparación especial.

PROBLEMAS DE ELECTROTECNIA Y DE ELECTRONICA INDUSTRIAL

PETROV V., SHLAPINTOJ L.

La selección de los problemas planteada por los ingenieros electricistas soviéticos V. Petrov y L. Shlapintoj, consta de dos partes.

En la primera parte se incluyen problemas de electrotecnia, de electrostática, leyes de la corriente contínua, electromagnetismo, inducción electromagnética, corriente alterna mono y trifásica, mediciones eléctricas, transformadores y máquinas eléctricas de corriente continua y alterna.

La segunda parte contiene problemas de los fundamentos de la electrónica industrial: válvulas electrónicas, aparatos iónicos, fotoelementos, diodos y triodos semiconductores, rectificadores, generadores y relés.

El libro sirve como manual para los estudiantes de las escuelas técnicas profesionales, también puede utilizarse para la enseñanza individual o en grupos.

MEDICION DE FUERZAS PEQUEÑAS EN EXPERIMENTOS FISICOS

BRAGUINSKI V., MANUKIN A.

En esta monografía se examinan problemas relacionados con la medición de fuerzas y desplazamientos pequeños al realizar experimentos físicos exactos con

cuerpos de prueba; se hace un análisis del comportamiento del oscilador macroscópico al accionar sobre él una gran fuerza regular externa, se estudia la influencia dinámica y fluctuacional del instrumento que registra los desplazamientos pequeños mecánicos del cuerpo de prueba y están formulados los principios de la estrategia óptima de las dimensiones teniendo en cuenta las variaciones cuánticas del instrumento. Se adjunta la descripción de algunos experimentos, donde la detección del efecto se reduce a la medición de fuerzas pequeñas y momentos de fuerzas. Está descrito con todo detalle el experimento fundamental de comprobación del principio de equivalencia. Se examinan las condiciones que debe satisfacer el acelerómetro para crear un aparato cósmico que se mueve solamente bajo la acción de fuerzas gravitacionales. El libro presenta un resumen de las fuerzas posibles astrofísicas de la emisión gravitacional y discute las perspectivas del aumento de la sensibilidad de detectores gravitacionales de varios tipos.